MAI 2006 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

SCHWERPUNKT BIOMEDIZIN

- ▶ Neuartige Schmerzmittel
- ▶ Nanobodys
- ▶ Zähne aus dem Reagenzglas

- ▶ ESSAY: Was ist Zeit?
- ▶ Der Erfinder Nikola Tesla

www.spektrum.de

HIRNFORSCHUNG

Das Rätsel ICH

Neurobiologen auf den Spuren des Gefühls, man selbst zu sein

ASTRONOMIE

Wie entstehen Braune Zwerge?

KLIMAGESCHICHTE

Wie schnell erkaltete die Urerde?

EVOLUTION

Wie wuchsen die Dinosaurier?

D6179E
13,50 sFr/Luxemburg 8,– €

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Der Ethnologe, der unter die Sterne fiel

Liebe Spektrum-Leser,

Anfang dieses Jahres trat Götz Hoeppe (36) in unsere Redaktion ein, zuständig vor allem für Astronomie und Wissenschaftsgeschichte. In den Wissenschaftsjournalismus hat ihn ein ungewöhnlicher Werdegang geführt. Schon als Neunjähriger schloss er sich einem Club von Amateurastronomen an. Nach dem Physik-Grundstudium in Göttingen verhalf ihm ein Fulbright-Stipendium zu Forschungen an der University of New Mexico in Albuquerque.

Nicht weit davon entfernt befindet sich das »Very Large Array«. Mit dessen 27 Radioteleskopen untersuchte der angehende Astronom neu entdeckte Zwerggalaxien. Doch auch den Ureinwohnern der Region begegnete er. Mit einem Amateurteleskop besuchte er die dortigen Zuni-Indianer und zeigte ihren Kindern den nächtlichen Sternhimmel. »Eine seltsame Erfahrung«, erinnert sich Hoeppe. Ein alter Indianer überwachte seine Sternstunde. Denn die Zunis lehnen es ab, die Sterne zu zählen. »Das würde den Menschen eine Macht geben, die ihnen nicht zusteht.«

Eine anschließende Weltreise nach Australien über Indien und Indonesien sollte seine Lebensplanung auf den Kopf stellen. In Tibet fuhr er mit dem Fahrrad von Lhasa nach Kathmandu, in Papua-Neuguinea sprach er mit Fischern über ihre Navigationskünste mit Hilfe von Sternbildern. Bereits in Madras war ihm Lévi-Strauss' »Strukturale Anthropologie« in die Hand gefallen. Darin beklagt der französische Ethnologe, dass mehr für die Beobachtung eines vorbeiziehenden Kometen ausgegeben werde als für Versuche, das kulturelle Gedächtnis der Menschheit zu retten. »Das war die Wende«, sagt Hoeppe. »Ich ging nach Berlin und studierte Ethnologie.«

Die Feldforschung für seine Doktorarbeit führte ihn erneut nach Indien: Im Bundesstaat Kerala an der Südspitze des Subkontinents lebte er in einem Fischerdorf und erlernte die Sprache der Einwohner. »Malayalam hat die Grammatik von Tamil und den Wortschatz des Sanskrit«, berichtet Götz Hoeppe. Zunehmende Überfischung durch Tausende von Trawlern, die mit ihren Netzen den Meeresgrund aufwühlen, bedroht die Existenzgrundlage der einheimischen Fischer. Hoeppe protokollierte die Reaktionen der Dorfgesellschaft auf die drastischen Veränderungen ihrer Umwelt.

Aber der frischgebackene Ethnologe hatte seine Jugendliebe nicht vergessen. Unser Schwestermagazin »Sterne und Weltraum«, angesiedelt im Heidelberger im Max-Planck-Institut für Astronomie, bot ihm 2002 erneut die Chance, Himmelskunde hautnah zu erleben und diesmal zudem darüber zu berichten. Hoeppes dabei erworbene Erfahrung kommt nun »Spektrum« zugute: in diesem Heft mit einem Kommentar zur Situation der Nasa (S. 22) und, von ihm betreut, mit Artikeln über Braune Zwerge (S. 42) sowie den Technikpionier Nikola Tesla (S. 88).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

GÖTZ HOEPPE

CLAUS SCHÄFER / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Neu bei Spektrum: Götz Hoeppe (im Bild oben zusammen mit Fischern auf der Insel Manus, Papua-Neuguinea), betreut bei »Spektrum« die Astronomie.

INHALT

SPEKTROGRAMM

10 DNA-Origami · Kosmischer Überschallknall · Pompeji des Ostens · Urbiber unter Echsen u. a.

13 **Bild des Monats**
Ältester Krater der Sahara

FORSCHUNG AKTUELL

14 **Wasserreiche Frühzeit des Mars**
Älteste Klimaphasen des Roten Planeten waren von Wasser geprägt

17 **Extremszenario abgesagt**
Schwankungsbreite der Klimaprognosen verringert sich

21 **Die Antenne der Zelle**
Der Mensch nutzt noch Mechanismen aus der Zeit der Urtierchen

THEMEN

▶ 26 PALÄONTOLOGIE
Wachstum der Dinosaurier

▶ 34 TITELTHEMA HIRNFORSCHUNG
Suche nach dem Sitz des Selbst

▶ 42 ASTRONOMIE
Rätselhafte Zwergengeburt

▶ SCHWERPUNKT BIOMEDIZIN 54

54 GEWEBEZUCHT
Biologischer Zahnersatz

62 NANO-ANTIKÖRPER
Medizinische Cruisemissiles

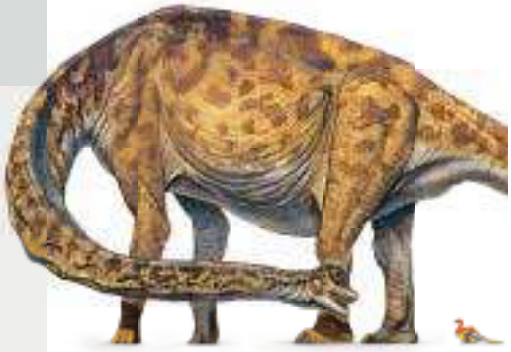
67 SCHMERZMITTEL
Ein Gift gegen die Pein

▶ 70 ERDGESCHICHTE
Trotz heißer Geburt gab sich der Erdball nach außen schnell »cool«

▶ 88 TECHNIKGESCHICHTE
Nikola Tesla – Erfinder und Fantast

▶ 110 ESSAY
Die Zeit und ihre Richtung – ein ewiges Rätsel der Physik

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

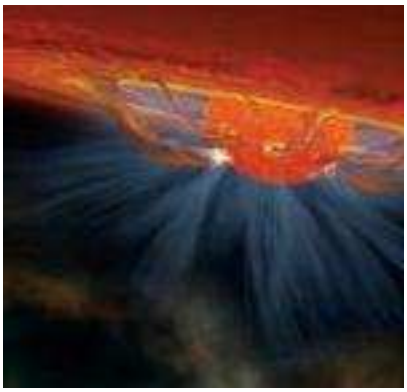


SEITE 26

DINOSAURIER

Rasanter Riesenwuchs

Andere Reptilien wachsen langsam, dafür immer. Die Dinosaurier aber legten in der Jugend einen Spurt ein. Mit 20 Jahren waren sie groß



SEITE 42

ASTRONOMIE

Geburt der Braunen Zwerge

Noch ist die Entstehung dieser Grenzgänger zwischen Sternen und Planeten rätselhaft – genauso wie die Frage, was Sterne und Planeten wirklich voneinander unterscheidet

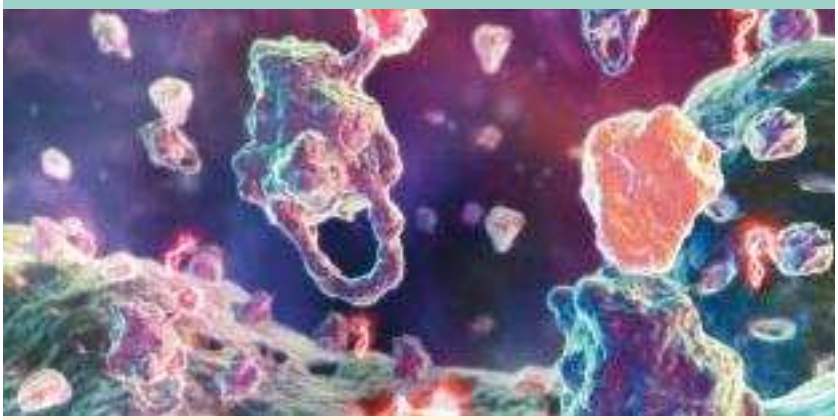
SEITE 70

GEOPHYSIK

Urerde früh bewohnbar

Bis 4,4 Milliarden Jahre alte Zirkonkristalle belegen, dass die Oberfläche unseres Planeten schon 100 Millionen Jahre nach seiner Geburt nicht mehr glutflüssig war

SCHWERPUNKT BIOMEDIZIN



Forschen für den Menschen

SEITE 54

Von biologischem Zahnersatz über vielseitige therapeutische Mini-Antikörper bis zu neuartigen Schmerzmitteln aus dem Gift einer Meeresschnecke – bei diesen ungewöhnlichen Entwicklungen aus der biomedizinischen Forschung dient jeweils die Natur als Vorbild

TITELTHEMA HIRNFORSCHUNG SEITE 34

Wo sitzt das Ich im Gehirn?

Wie entsteht das dauerhafte Erleben des eigenen Selbst? Neurobiologen suchen nach Hirnregionen, die besonders aktiv werden, wenn wir über uns nachdenken

SEITE 84

TECHNIKGESCHICHTE

Nikola Tesla

Mit seinen Erfindungen trug der serbisch-amerikanische Ingenieur wesentlich zum Siegeszug des Wechselstromsystems bei. Mit Showtalent und skurrilen Ideen wurde er jedoch immer mehr zum Enfant terrible

SEITE 110

ESSAY

Woher nehmen wir die Zeit?

Was uns subjektiv klar ist, können Physiker nur mühsam erklären: die Richtung des Zeitpfeils. Das Vergehen der Zeit entpuppt sich als Geschenk des Zufalls

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

MAI 2006

KOMMENTARE

22 **Nachgehakt**
Der Wissenschaft einen Streich gespielt

25 **Springers Einwürfe**
Forschungsinstitut für letzte Fragen

WISSENSCHAFT IM ...

86 **Rückblick:** Künstliche Eierschalen · Schlau und selbstbewusst im Schlaf · Kälter als kalt u. a.

52 **Alltag:** Der Ball ist rund

JUNGE WISSENSCHAFT

82 **Die Mathematikgenies an der Wümme**
Talentförderung Mathematik

REZENSIONEN

96 **Bilder der Erde** von Thomas Cussens, Richard Chiles, Paul Karwinski und Mike Oehlers
Wir ernten, was wir säen von James Gustave Speth
Protonentherapie von Hans Rinecker
Das Gesicht des Mörders von Kevin Guilfoile
Das X in Sex von David Bainbridge

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

105 **Das Antiparallelogramm (II)**

WEITERE RUBRIKEN

3 **Editorial**
8 **Leserbriefe/Impressum**
108 **Preisrätsel**
114 **Vorschau**

TITELBILD

Neurologen verschaffen sich Einblicke ins Innere des Hirns, hier symbolisiert durch eine Pupille, um den Sitz des »Selbst« zu ergründen

Mauritius images

DAS **ZUSATZANGEBOT SPEKTRUM-PLUS** FÜR ABONNENTEN FINDEN SIE AUF DER NÄCHSTEN SEITE ▶

LESERBRIEFE

Wille und Wissen

Essay, Februar 2006

Nicht alles verstehen

Warum haben wir das Gefühl, mit unserem Geist von den Naturgesetzen losgelöst zu sein? Warum können wir spontane, unlogische Entscheidungen treffen?

Diese Fähigkeit kommt meiner Meinung nach nicht von »nicht alles wissen«, sondern von »nicht alles verstehen, am wenigsten uns selbst« – will heißen: All die Dinge, die uns passiert sind, haben unseren Charakter zu einem solch komplexen Gebilde geformt, dass wir die im Grunde logischen Abläufe, die zu unserer aktuellen Entscheidung geführt haben, nicht verstehen. Auch können sie niemals rekonstruiert werden. Zudem ermöglicht es uns diese Komplexität ja auch, uns selbst zu beeinflussen, sodass hier eine noch weniger greifbare Wechselwirkung entsteht.

Also mein freier Wille existiert, weil nicht bis ins letzte Detail bekannt ist, welche Zusammenhänge und Einflüsse dazu geführt haben, dass mein Wille der wurde, der er aktuell ist.

Jonas Schnaitmann, München

Raum für Verantwortung

Herr Springer gibt einen kurzen, aber weit gespannten Überblick über das Problem der Willensfreiheit. Dabei fällt mir zweierlei auf:

Erstens die ungewohnte Ausdehnung des Begriffs »in der Sicht der ersten Person«. Mein Wille ist frei – und ich kann den Weltlauf nach Belieben verändern. Das hieße ja, dass auch der Erfolg nur von mir abhängt, zum Beispiel nicht nur der Entschluss, diesen Leserbrief zu schreiben, sondern auch die Veröffentlichung.

Zweitens verlässt er das Problem der naturgesetzlichen Determiniertheit und die schwer nachvollziehbaren Schlussfolgerungen der Schuldunfähigkeit und der »Entthronung des Menschen als denkendes Wesen« und spricht nur von Zielen, Wahl, Entscheidung, also psychischen, nicht physiologischen Begriffen, und von Verkehrsregeln, also juristischen Gesetzen, und nicht von Naturgesetzen. Auch das sind (kausale) Zusammenhänge, welche die Willensfreiheit beschränken. Aber es bleibt sehr wohl Raum für Verantwortung. Und gerade in der jetzigen Zeit steht die Forderung nach Verantwortungsbewusstsein immer an vorderster Stelle.

Dr. Susanne Reichrath, Isny

Ein Bündel von Alternativen

Auch wenn niemand behaupten kann, die Quantenmechanik wirklich verstanden zu haben, wird im Allgemeinen anerkannt, dass mit ihr die Welt nichtdeterministisch beschrieben wird.

Die Welt läuft also, zumindest nach der Quantenmechanik, keineswegs wie ein Uhrwerk deterministisch ab, vielmehr ergeben sich immer wieder neue, unvorhersehbare Verzweigungen, und damit ist in dieser Welt eben doch Platz für Freiheit in dem oben genannten Sinn. Das erlaubt es auch, physikalische Experimente und menschliche Entscheidungen als ähnliche Prozesse anzusehen: In einem physikalischen Experiment legen die Versuchsbedingungen das Spektrum der möglichen Ausgänge des Experiments fest; aus diesem Spektrum wählt dann die (freie) Natur mit Hilfe des Zufalls ein bestimmtes Ergebnis aus. In einem menschlichen Entscheidungs-»Experiment« verbleibt nach dem Abwägungsprozess im Allgemeinen ein Bündel möglicher (sinnvoller und etwa gleichwertiger) Entscheidungsalternativen; aus diesem wählt dann der Mensch durch Spontaneität beziehungsweise durch »Freiheit« eine aus.

Dr. Gunter Berauer, München

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com

Kohlendioxidtrend natürlich erklärbar

Verhinderte der Mensch eine Eiszeit? Februar 2006

Unsere Warmzeit darf man nicht an den kurzen letzten drei Interglazialen messen. Sie gleicht eher der Zwischeneiszeit vor mehr als 500 000 Jahren, von der Eisbohrkerne gezeigt haben, dass sie etwa 28 000 Jahre dauerte. Da der aktuelle Temperaturverlauf nicht dem Muster der letzten Zwischeneiszeit folgt, ist dies auch nicht für die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre zu erwarten.

Die Weltmeere enthalten ungefähr 50-mal so viel CO_2

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Götz Hoeppe, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Gabriele Herbst, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda, Ina Raschke, Michael Vogel, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, D-70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 27 vom 01.01. 2006.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2006 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/ Managing Director, International: Dean Sanderson

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

wie die Atmosphäre. Erwärmt sich das Meerwasser, sinkt die Löslichkeit von Kohlendioxid und es gast aus. Der Autor stellt überrascht fest, dass nach 8000 v. h. die CO_2-Konzentration in der Luft weiter zunahm. Um diese Zeit gab es aber einen plötzlichen Temperaturanstieg um etwa 2° C. Ein Anstieg der CO_2-Konzentration in der Luft durch Entgasung aus den Meeren ist die logische Folge.

Nach Schätzungen von Archäologen haben 1 bis 5 Millionen Menschen die letzte Eiszeit überlebt. Um 8000 v. h. dürfte die Weltbevölkerung höchstens 10 bis 20 Millionen betragen haben. Diese wenigen Menschen mit ihrer geringen Produktivität konnten die Lufthülle kaum nennenswert beeinflussen.

Prof. Dr. Norbert Buchner, Winnenden

Aufforsten statt Vergraben

Können wir das Klimaproblem begraben? März 2006

Statt Kohlendioxid zu vergraben, sollte man den Kohlenstoff in biologischer Form binden, vor allem durch Aufforsten relativ trockener Gebiete. A. Hüttermann und J. O. Metzger belegen in einer Stellungnahme der Gesellschaft deutscher Chemiker, dass dies technisch und wirtschaftlich machbar ist und politisch durchsetzbar sein müsste. Es wäre weit billiger, eine Tonne CO_2 auf diese Weise zu binden, als sich ein Emissionsrecht für die gleiche Menge nach derzeitigem Preis zu kaufen. Wenn das Kioto-Protokoll erweitert und erlauben würde, das so gebundene CO_2 auf die Emissionsrechte anzurechnen, würde sich die Methode von selbst durchsetzen. Es gibt genügend Wüsten oder Halbwüsten, wo es wenigstens einmal pro Jahr regnet. Durch ihre Aufforstung könnte man alles derzeit freigesetzte CO_2 binden. Wasserverluste durch Abfließen, Verdunsten und Versickern kann man mit Erdwällen und durch Einpflügen von Wasser speichernden Bodenverbesserern vermindern.

Im Gegensatz zum Vergraben wäre das biologische Binden von Kohlendioxid sofort und in großem Umfang machbar, unabhängig von der CO_2-Quelle.

Werner Fuß, Garching

▲ Erzeugte der Anbau von Nassreis einen Treibhauseffekt?

Errata

Sudoku oder die einsamen Zahlen
März 2006
Im Kasten S. 105 müsste die 7 in der vorletzten Reihe im grünen Feld (e) um ein Kästchen weiter links stehen.

Morphware oder einer für alles, März 2006
Auf S. 69 in der mittleren Spalte wurde der Output eines XOR-Gatters falsch beschrieben. Er ist bei gleichen Eingangswerten 0, sonst 1.

Feynmans Regenbogen
Rezensionen, März 2006
Richard Feynman lebte von 1918 (nicht 1908) bis 1988.

Die frühe Evolution der Tiere
April 2006
Im Kasten S. 72 oben links haben wir unsere Erde zu alt gemacht; sie ist erst vor 4,5 Milliarden entstanden.

Die Redaktion

ANZEIGE

EVOLUTION

Farbiger Nektar lockt bunte Geckos

■ Das Auge isst mit, sagt man. Anscheinend gilt das auch für Geckos. Diese Erfahrung machten jedenfalls Forscher der Universität Zürich auf der Ile aux Aigrettes, einer kleinen Insel bei Mauritius. Die Biologen um Dennis Hansen präsentierten Geckos der Art *Phelsuma ornata* zwei künstlich hergestellte weiße Blumen, die sie mit farblosen oder rot gefärbten Zuckerlösungen füllten. Die meisten Tiere entschieden sich für den roten Nektar – allerdings nur dann, wenn er sich optisch vom Hintergrund der Blume abhob: In roten Blüten lockte er die Geckos kaum mehr als der farblose Sirup.

Hansens Experiment bestätigt die allgemeine Vermutung, dass Pflanzen im Lauf der Evolution kräftige Farben entwickelten, um über dieses Signal Tiere zur Bestäubung anzulocken. *P. ornata* ist selbst auch bunt gezeichnet, was laut früheren Studien eine wichtige Rolle bei seinem Sozialverhalten spielt. Die Vorliebe dieser Amphibien für Farben dürfte, so die Vermutung der Forscher, ein altes biologisches Erbe ist. Bunter Nektar kommt bei den Pflanzen auf der Ile aux Aigrettes nämlich nicht vor.

Biology Letters, Online-Vorabveröffentlichung, doi: 10.1098/rsbl.2006.0458

Je bunter, desto besser: Farbenprächtigen Geckos schmeckt rot eingefärbter Necktar.

PLANETOLOGIE

Wird auch Pluto zum Herrn der Ringe?

■ Als Aufnahmen des Weltraumteleskops Hubble vor einem Jahr dicht bei Pluto nicht nur den Lichtfleck seines Monds Charon, sondern noch zwei weitere helle Punkte zeigten, war das eine kleine Sensation. Sollte der äußerste Planet als erstes Objekt im Kuiper-Gürtel über mehr als einen Trabanten verfügen? Das haben neuere Analysen nun bestätigt. Demnach kreisen außer Charon zwei weitere Objekte, vorläufig P1 und P2 genannt, mit Durchmessern von 50 und 160 Kilometern um Pluto. Alle drei Monde bewegen sich, wie sich zeigte, fast in derselben Ebene, und ihre Umlaufzeiten stehen annähernd in ganzzahligen Verhältnissen zueinander. Das legt nahe, dass sie aus den Trümmern ein und desselben Asteroideneinschlags auf Pluto entstanden sind.

Allerdings sollten P1 und P2 nach Vermutungen eines Teams um Alan Stern vom Southwest Research Institute in San Antonio auf lange Sicht nicht von Bestand sein. Vielmehr würden sie durch den unablässigen Beschuss mit Kleinkörpern, die sich im Kuiper-Gürtel drängen, allmählich zerrieben. Die US-Forscher erwarten deshalb, dass die beiden Monde schließlich zu Staubringen zerfallen. Damit hätte auch ein Gesteinsplanet eine derartige Scheibe, die bisher nur von Gasriesen bekannt ist.

Nature, 23. 2. 2006, S. 439

ILLUSTRATION: DON DAVIS

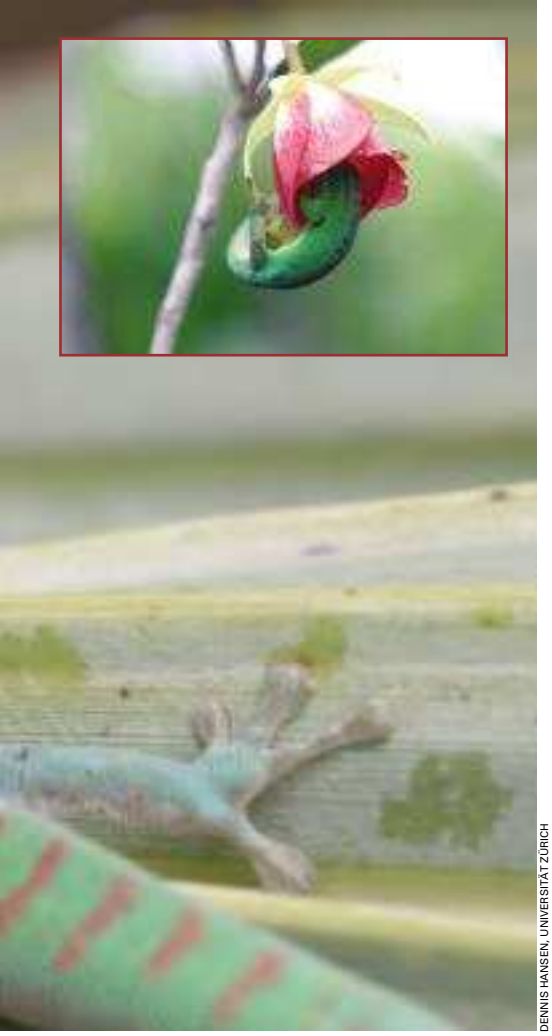
◄ Bei einem Einschlag wie auf diesem Gemälde könnten die Pluto-Monde entstanden sein.

NANOTECHNIK

DNA-Origami

■ Schon mancher Nanotechniker hat die Erbsubstanz DNA als Baumaterial zweckentfremdet. Aber keiner konnte sie so kunstvoll handhaben wie nun Paul W. K. Rothemund vom California Institute of Technology in Pasadena, der damit unter anderem eine Amerikakarte im Maßstab von 1 zu 200 Billionen, ein Grinsegesicht oder eine Miniaturschneeflocke schuf.

Der US-Forscher ging von dem rund 7000 Basen langen Erbstrang eines Virus aus und überlegte sich zunächst jeweils ein Muster, wie dieser – ähnlich dem Schussfaden beim Weben – parallel hin- und herlaufen müsste, um die gewünschte Figur zu erzeugen. Dann bestimmte er, an welchen Stellen »Heftklammern« nötig wären, um den DNA-Strang an den Enden wie eine Haarnadel umzubiegen und dazwischen periodisch mit den Nachbarschlaufen zu verketten. Anhand dieser Vorgaben berechnete ein selbst entwickeltes Computerprogramm einige hundert kurze DNA-Stücke, die sich spezifisch an den



DENNIS HANSEN, UNIVERSITÄT ZÜRICH

betreffenden Positionen an den Erbfaden anlagern, ihn dabei zur Doppelhelix ergänzen und gleichzeitig die nötigen Kurven und Verkettungen herstellen sollten. Diese synthetisierte Rothemund und gab sie in hohem Überschuss zu einer Lösung der Virus-DNA. Beim Erwärmen fügten sich daraus die gewünschten Gebilde von allein zusammen.

Was wie bloße Spielerei anmutet, hat durchaus einen seriösen Hintergrund: Rothemund wollte demonstrieren, dass sich mit dem Erbsubstanzfaden beliebig geformte Objekte »stricken« lassen – und damit im Prinzip auch jene winzigen molekularen Maschinen, die den Nanotechnologen vorschweben.

Nature, 16.3. 2006, S. 283

NICK PAPADAKIS UND PAUL ROTHEMUND, CALTECH / NATURE

◄ Dieser gelb eingefärbte Smiley wurde aus der Erbsubstanz eines Virus (weiß) gestrickt.

ASTRONOMIE

Kosmischer Crash

Wenn ein Düsenjet die Schallmauer durchbricht, erzeugt er eine Stoßwelle, die wir am Boden als lauten Knall hören. Eine ganz ähnliche Erscheinung hat ein internationales Astronomenteam nun im Kosmos untersucht. Es richtete das im Weltall stationierte Spitzer-Teleskop auf Stephans Quintett, eine etwa 300 Millionen Lichtjahre entfernte Gruppe von fünf Galaxien im Sternbild Pegasus. Eine davon rast auf drei andere zu und verursacht dabei im intergalaktischen Medium eine Stoßwelle, die größer ist als unsere Milchstraße. Dadurch werden Wasserstoffatome so stark aufgeheizt, dass sie grün leuchten. Außerdem verbinden sie sich hinter der Stoßfront zu zweiatomigen Molekülen, die heftig schwingen und dabei Infrarotlicht aussenden.

In dessen Spektrum konnten die Forscher eine extrem verschmierte Emissionslinie ausmachen – Ausdruck gewaltiger Turbulenzen. Die genaue Auswertung ergab eine Geschwindigkeit bis 3 Millionen Kilometer pro Stunde, also etwa Mach 2600.

Die Verhältnisse in Stephans Quintett vermitteln einen Eindruck von der Frühzeit des Universums, als die Galaxiendichte noch sehr hoch war und sich wohl viele ähnliche Kollisionen abgespielt haben. Auch der Milchstraße steht noch ein großer Crash bevor – wenn sie in zwei Milliarden Jahren die Andromedagalaxie rammt. *Pressemitteilung der Max-Planck-Gesellschaft, 3.3. 2006*

NASA / JPL-CALTECH / MAX-PLANCK-INSTITUT / P. APPLETON (SSC/CALTECH)

Grün leuchtende Wasserstoffatome illuminieren eine gewaltige Stoßwelle in Stephans Quintett.

ARCHÄOLOGIE

Verschüttetem Königreich auf der Spur

Es war eine der schlimmsten Naturkatastrophen der neueren Menschheitsgeschichte: Als 1815 der Vulkan Tambora auf der Kleinen Sunda-Insel Sumbawa ausbrach, begrub er 117 000 Menschen unter seiner Asche. Dabei verschüttete er auch ein bisher kaum bekanntes Miniaturkönigreich. Nun haben Forscher um Haraldur Sigurdsson von der Universität von Rhode Island in Kingston einen ersten Überrest davon wieder ans Licht gebracht. Unter einer rund drei Meter dicken Ascheschicht legten sie etwa fünf Kilometer von der Küste entfernt die Grundmauern eines Hauses frei. Es dürfte zu einem Dorf gehören, in dessen Zentrum die Forscher einen Palast vermuten. Da das Leben in dem Moment eingefroren wurde, als der Vulkan alles unter sich begrub, vergleicht Sigurdsson, der auch den Ausbruch des Vesuv erforscht hat, die Siedlung mit Pompeji.

Im Innern des Hauses fanden sich neben den konservierten Leichen zweier Erwachsener wertvolle Kulturzeugnisse: Bronzeschalen, Keramiktöpfe, Eisengeräte und andere Gegenstände. In Form und Verzierung weisen sie auf kulturelle Einflüsse aus Vietnam und Kambodscha hin. Zugleich zeugen sie vom Wohlstand der einstigen Bewohner Sumbawas, die in Asien für ihren Honig, ihre Pferde und ihr Sandelholz bekannt waren.

Pressemitteilung der Universität von Rhode Island vom 27.2. 2006

MIT FRDL. GEN. VON URI NEWS BUREAU

Ausgegrabene Keramik- und Bronzeobjekte geben einen ersten Einblick in die Kultur des einstigen indonesischen Königreichs Tambora.

Der vor 164 Millionen Jahren lebende *Castorocauda* ähnelte dem heutigen Biber, war aber kein Nagetier.

ZHE-XI LUO / CMNH

PALÄONTOLOGIE

»Biber« aus der Saurierwelt

Säugetiere fristeten während der Kreidezeit ein Schattendasein; nur kleine, nachtaktive Vertreter konnten sich gegen die übermächtigen Dinosaurier behaupten – so die gängige Meinung. Doch die Gegenbeispiele häufen sich. Nach dem Fund eines fast einen Meter langen und bis vierzehn Kilogramm schweren Säugers vor über einem Jahr hat nun ein Forscherteam um Qiang Ji nahe Peking die Überreste eines Tiers entdeckt, das dem heutigen Biber ähnelt. So besaß der gut vierzig Zentimeter lange *Castorocauda lutrasimilis* einen breiten, schuppigen Schwanz, kräftige Arme und einen dichten Pelz. Er lebte vor etwa 164 Millionen Jahren in Flüssen oder an Seeufern, konnte sich aber auch an Land fortbewegen.

Demnach besetzte der frühe Säuger eine ähnliche ökologische Nische wie die heutigen Biber. Da diese sich erst vor etwa 55 bis 25 Millionen Jahren entwickelten, ist *C. lutrasimilis* aber nicht direkt mit ihnen verwandt. Außerdem war er kein Pflanzenfresser, sondern fing mit seinen scharfen Zähnen im sechs Zentimeter langen Kiefer wie die Otter Fische.

Science, 24.2. 2006, S. 1123

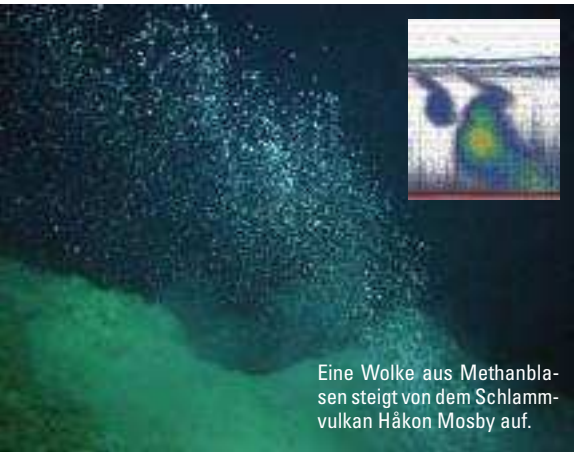
MEERESFORSCHUNG

Treibhaus aus der Tiefsee

Bisher galten Ozeane nicht als Klimasünder – im Gegenteil: Absorbieren sie doch das Treibhausgas Kohlendioxid aus der Luft. Nun aber entdeckte ein deutsch-französisches Forscherteam, dass der unterseeische Schlammvulkan Håkon Mosby zwischen Spitzbergen und Norwegen große Mengen an Methan freisetzt. Zwar war vorher schon bekannt, dass dieses Gas, das 20-mal klimawirksamer ist als Kohlendioxid, an Schlammvulkanen austritt. Allerdings hielt man die Mengen für gering. Außerdem würden, so die Vermutung, Mikroorganismen das Methan großenteils abbauen, bevor es aufsteigen und in die Atmosphäre gelangen könnte.

Eberhard Sauter vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven beobachtete mit seinen Kollegen nun jedoch über Håkon Mosby eine Wolke aus Methanblasen, die sich etwa 800 Meter weit über den Meeresboden erhob. Wie optische und akustische Messungen ergaben, gelangt ein bedeutender Anteil davon bis an die Wasseroberfläche. Demnach dürften pro Jahr einige hundert Tonnen des Gases in die Atmosphäre entweichen. Die Anzahl unterseeischer Schlammvulkane weltweit wird auf mehrere Tausend geschätzt. Deshalb kann ihr Beitrag zur Klimaentwicklung durchaus von Bedeutung sein.

Earth and Planetary Science Letters, Bd. 243, S. 354



Eine Wolke aus Methanblasen steigt von dem Schlammvulkan Håkon Mosby auf.

EBERHARD SAUTER, AWI BREMERHAVEN

VOGELGRIPPE

H5N1 auf dem Sprung

Die Vogelgrippe ist noch immer eine Tierseuche, doch ähnelt der Erreger menschlichen Influenzaviren bereits in überraschend hohem Maß. Zu diesem Ergebnis kam ein Forscherteam um James Stevens vom Scripps Research Institute in La Jolla (Kalifornien). Es verglich das H5N1-Virus, an dem 2004 ein vietnamesischer Junge starb, mit den Erregern der drei großen Influenzapandemien des 20. Jahrhunderts und mit einem 1997 bei einer Ente isolierten Vogelgrippevirus. Im Zentrum stand dabei das Hämagglutinin: ein virales Oberflächenprotein, das dem Erreger Zugang zu den Wirtszellen verschafft, indem es sich an Rezeptoren auf deren Außenmembran anlagert. Wie Stevens Team feststellte, gleicht das Hämagglutinin aus der H5N1-Probe des verstorbenen Jungen demjenigen menschlicher Influenzaviren mehr als dem aus dem Virus der Ente. Demnach hat H5N1 den Sprung zum Menschen schon gut zur Hälfte geschafft.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Eingefärbte elektronenmikroskopische Aufnahme von Influenza-Viruspartikeln

Inzwischen ist auch klar, welche Anpassung ihm noch fehlt. Wie Yoshihiro Kawaoka von der Universität von Wisconsin in Madison bei der Untersuchung von Gewebeproben menschlicher Opfer von H5N1 herausfand, sitzt das Virus zu tief in den Atemwegen, um beim Niesen oder Husten übertragen zu werden. Das verhindert bisher die Weitergabe von Mensch zu Mensch.

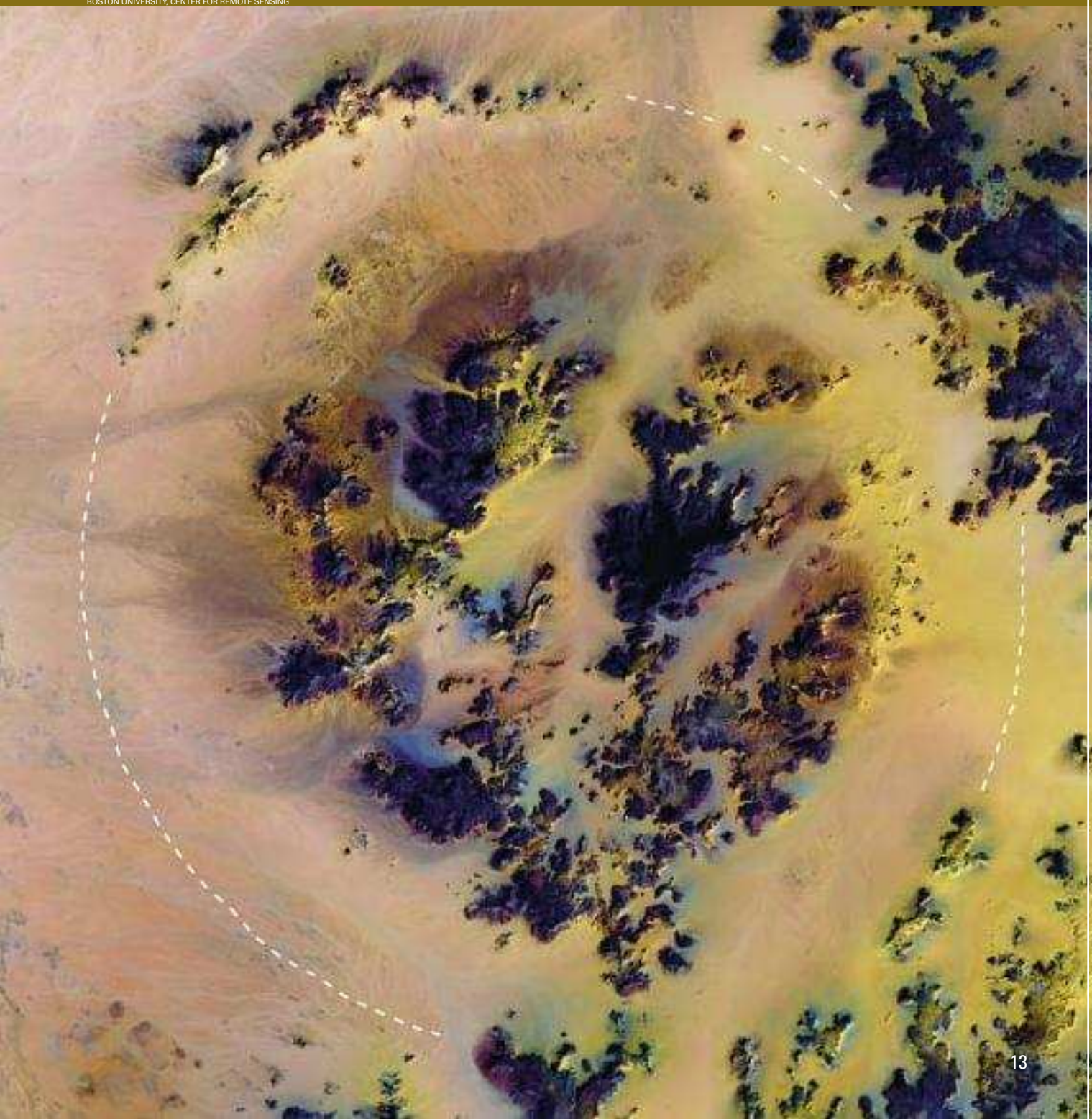
Sciencexpress, 20.3. 2006 / Nature, 23.3. 2006, S. 435

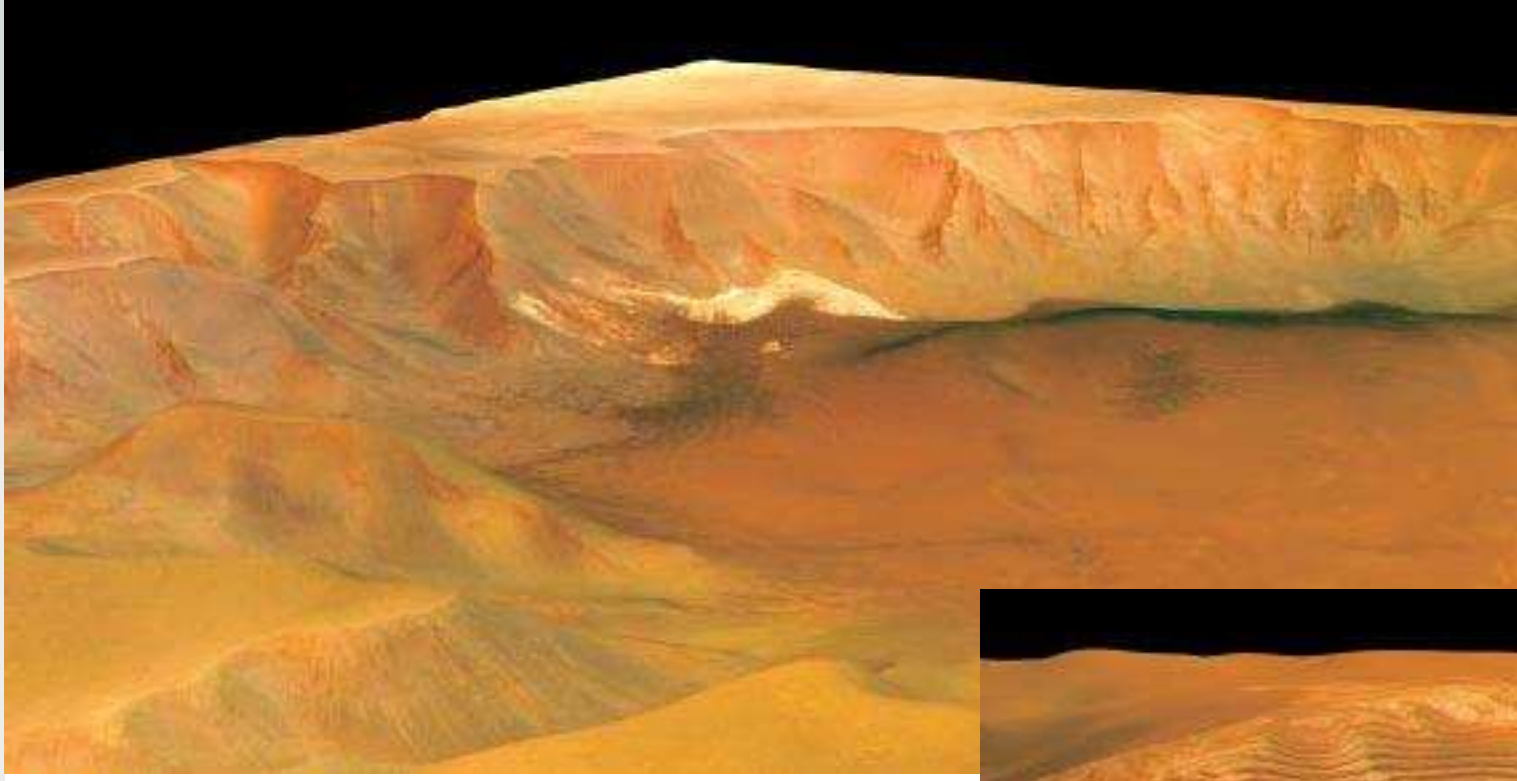
Mitarbeit: Sonja Huhndorf und Stephanie Hügler

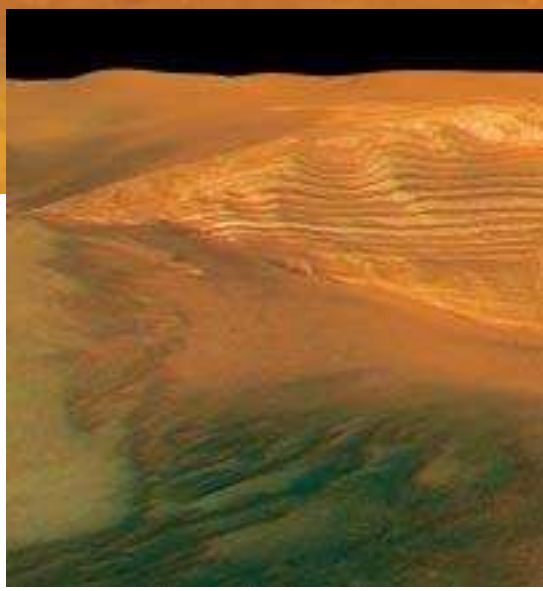
Größter Krater der Sahara

Bisher galt eine zwölf Kilometer breite Ringstruktur im Tschad als größte Einschlagspur eines Himmelskörpers in der Sahara. Nun hat Farouk El-Baz von der Boston University auf Satellitenbildern der Landsat-Serie einen neuen Rekordhalter entdeckt und ihn nach dem arabischen Wort für »groß« Kebira genannt. Er befindet sich im Südwesten Ägyptens und setzt sich wie die Einschlagkrater auf dem Mond aus zwei Ringen zusammen, von denen der äußere einen Durchmesser von etwa 31 Kilometern hat. Erzeugt wurde er laut El-Baz beim Aufprall eines mindestens einen Kilometer großen Objekts. Der Zeitpunkt ist noch unklar; sicher lässt sich nur sagen, dass das umgebende Gelände aus 100 Millionen Jahre altem Sandstein besteht. Der Krater ist durch Wind und Wasser stark erodiert und vom Boden aus nicht als solcher zu erkennen. Wohl deshalb wurde er erst jetzt entdeckt. Zwei ehemalige Flussbetten zerteilen ihn in der Mitte. Zur besseren Sichtbarkeit wurde der äußere Ring auf dieser Falschfarbenaufnahme gestrichelt nachgezeichnet.

BOSTON UNIVERSITY, CENTER FOR REMOTE SENSING







PLANETOLOGIE

Wasserreiche Frühzeit des Mars

Aufnahmen und Spektralanalysen äquatornaher Ablagerungen weisen auf zwei unterschiedliche frühe Klimaphasen des Roten Planeten hin. In beiden scheint flüssiges Wasser eine große Rolle gespielt zu haben.

Von Thorsten Dambeck

Nicht weit entfernt von den gewaltigen Schildvulkanen der Tharsis-Region auf dem Mars liegt ein etwa 4000 Kilometer langes Talsystem. Planetologen tauften es Valles Marineris – nach der US-Sonde Mariner 9, welche diese riesige Narbe in der Oberfläche unseres Nachbarplaneten einst entdeckte. Nach übereinstimmender Ansicht der Experten ist die Struktur nicht durch Erosion entstanden, sondern durch Kräfte tief im Innern des Planeten, die ausgedehnte Krustenblöcke anhoben, absenkten, übereinander schoben oder auseinander rissen. Insofern unterscheidet sich das Valles Marineris deutlich vom Grand Canyon, der bekanntesten Schlucht auf der Erde, wo sich die Wasser des Colorado in rund fünf Millionen Jahren tief ins Gestein gruben.

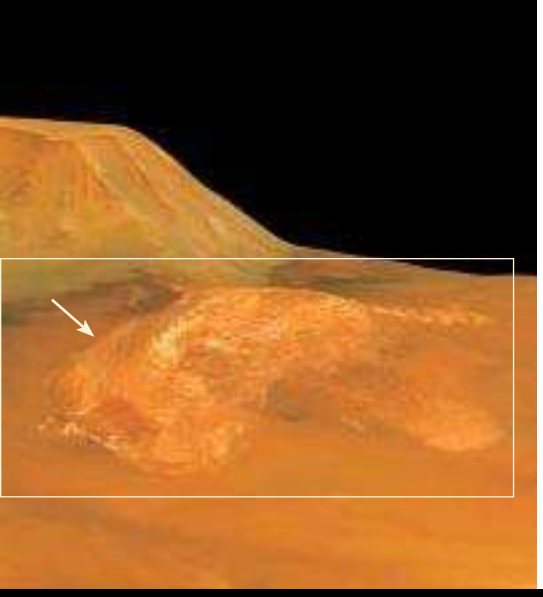
Nun hat der spektakuläre Marscanyon erneut von sich reden gemacht. Obwohl seine genaue Entstehungsgeschichte weiter im Dunkeln bleibt, wurden auf dem Talgrund an mehreren Stellen Ablagerungen ausgemacht, die neue Einsichten in die Bedingungen auf dem jungen Mars vermitteln – zu einer Zeit, als sich Valles Marineris bereits gebildet hatte.

Forscher des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) haben diese geschichteten Sedimente im Detail untersucht. Grundlage waren Bilder des Esa-Satelliten Mars Express, die mit der High Resolution Stereo Camera (HRSC) aufgenommen wurden. Dieses in Deutschland entwickelte Gerät liefert dreidimensionale Farbansichten, die bis zu zehn Meter kleine Details zeigen, und kann so die Marslandschaft sehr detailliert räumlich darstellen.

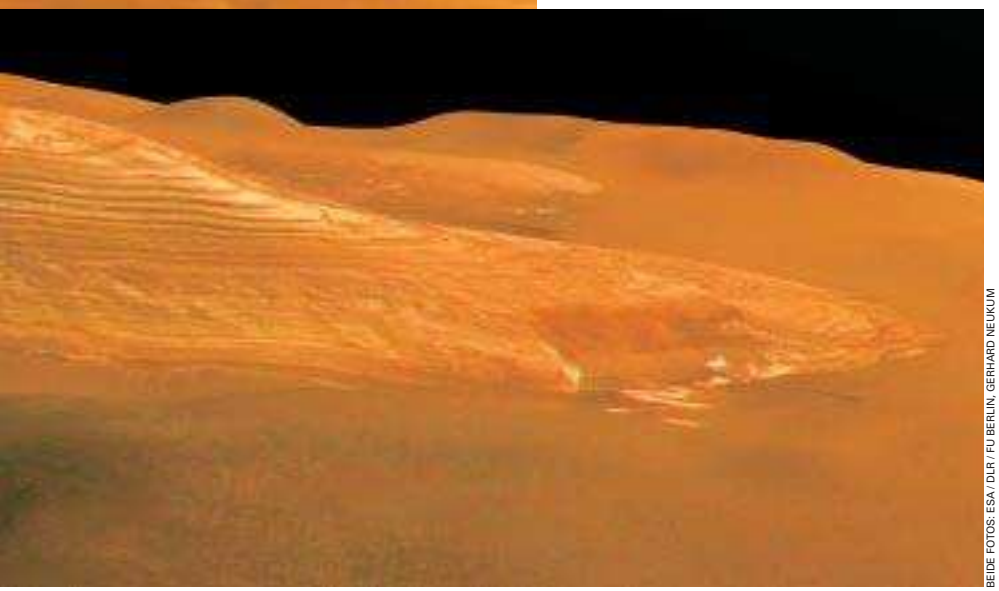
Eine der jetzt genauer untersuchten Sedimentstrukturen ist Hebes Mensa, ein etwa drei Kilometer hoher Tafelberg im Hebes-Tal nördlich der Hauptschlucht von Valles Marineris. Er hat eine Grundfläche von etwa 120 mal 50 Kilometern und erhebt sich vom Talboden bis fast auf das Höhenniveau des Canyonrands (Bild auf S. 16 unten).

Wie kann solch ein Gebilde entstanden sein? Denkbar wäre, dass sich die Schichten in einem Gewässer ablagerten. DLR-Geologe Ernst Hauber ist bei der Untersuchung der Stereobilder jedoch zu der Ansicht gelangt, dass stattdessen ausdauernder Vulkanismus am Werk war. »Die einzelnen Schichten sind nicht horizontal abgelagert worden, wie es in Wasser zu erwarten wäre«, erklärt Hauber. Vielmehr fallen sie beidseitig zum Rand des Tafelbergs ab. Dieses Neigungsmuster entstand vermutlich, als aus einer Spalte am Talgrund vulkanisches Material explosiv herausgeschleudert wurde und seitlich wieder herabregnete. Gegen die Sedimentation in einem Gewässer spricht auch, dass das Hebes-Tal nach allen Seiten abgeschlossen ist. Hauber: »Es gibt dort keine Zuflüsse.«

Aus der Geometrie vergleichbarer Ablagerungen in anderen Teilen von Valles Marineris lassen sich ähnliche Schlüs-



Am Boden der Schlucht Juventae Chasma befindet sich eine Erhebung, deren Schichten an der Seite Terrassen bilden, sodass der Eindruck eines Weinbergs entsteht. Wie kann sich eine solche Struktur auf dem Mars gebildet haben?



BEIDE FOTOS: ESA / DLR / FU BERLIN, GERHARD NEUKUM

ANZEIGE

se ziehen. Doch nicht bei allen »Interior Layered Deposits« oder kurz ILDs, wie diese Gebilde im Marsgeologen-Jargon heißen, ergibt sich ein so klares Bild. Das gilt etwa für einen 2,5 Kilometer hohen Berg am Grund des Tals Juventae Chasma, das einige hundert Kilometer weiter östlich liegt (Bild oben). Seine hellen Ablagerungen sind fast perfekt horizontal geschichtet und sein terrassenförmiges Äußeres erinnert an einen Weinberg. Wurde er einst in einem Gewässer abgelagert?

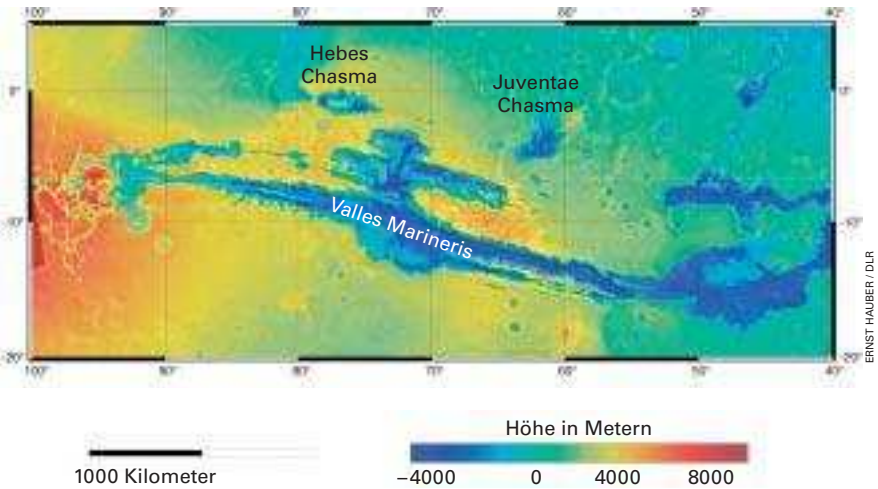
Gips am Fuß geschichteter Tafelberge

Hauber bleibt skeptisch. Der Wasserstand in Valles Marineris müsste dafür gewaltige Ausmaße gehabt haben. Eine andere, originelle Erklärung gab kürzlich Mary Chapman vom Geologischen Dienst der USA bei einem Mars-Symposion im Berliner DLR-Institut für Planetenforschung. Demnach seien die Berge ursprünglich subglaziale Vulkane gewesen, wie man sie auf der Erde etwa aus Island, dem nördlichen Kanada oder der Antarktis kennt. Dies würde jedoch bedeuten, dass der Talgrund des äquatornahen Valles Marineris einst unter einer mehrere Kilometer mächtigen Eisdecke lag – was eher unwahrscheinlich ist.

Weitere aufschlussreiche Bilder und Spektren lieferte das französische Omega-Instrument (Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité), das ebenfalls an Bord von Mars Express seinen Dienst tut. Mit ihm werden seit zwei Jahren die Minerale auf der Marsoberfläche kartiert. Es kann Licht 352 verschiedener Wellenlängen gesondert nachweisen – vom sichtbaren bis zum infraroten Spektralbereich. Bei einer Auflösung zwischen einem und fünf Kilometern hat Omega mittlerweile fast den gesamten Planeten abgerastert.

Am Fuß von Hebes Mensa registrierte das Spektrometer die Signatur wasserhaltiger Minerale, so genannter polyhydratisierter Sulfate – desgleichen am Tafel- ▷

Wie eine riesige Narbe durchzieht ein 4000 Kilometer langes Canyonsystem namens Valles Marineris die Marsoberfläche. Nördlich seiner Hauptschlucht – in den Tälern Hebes und Juventae Chasma – liegen zwei geschichtete Tafelberge, die nun anhand von Bildern der hochauflösenden Stereokamera an Bord der Sonde Mars Express genauer untersucht wurden.



ERNST HAUBER / DLR

berg in Juventae Chasma. DLR-Forscher Hauber interpretiert den Fund als mineralische Spur früherer Grundwasservorkommen: »Während der vulkanischen Eruptionen haben sich diese Minerale durch die Einwirkung von heißem Wasser oder Dampf gebildet.« Das geschah nach Schätzungen der Planetologen vor ungefähr 3,5 Milliarden Jahren in der so genannten früh-hesperischen Periode.

Auch an anderen Stellen auf der Marsoberfläche finden sich vereinzelt wasserhaltige Sulfatminerale wie Kieserit, Gips und Jarosit. Letzterer konnte mit dem deutschen Mössbauer-Spektrometer nachgewiesen werden, das seit über zwei Jahren mit dem US-Rover Opportunity durch die Ebene von Terra Meridiani rollt. Der Jarosit steht dort allerdings nicht mit Vulkanismus in Verbindung. Nasa-Experten vermuten vielmehr, dass sich bei Überflutungen mehrfach flache, salzhaltige Seen bildeten, die mit der Zeit austrockneten. Dabei schied sich eine Kruste aus den vorher gelösten Sulfaten ab.

Was Tone verraten

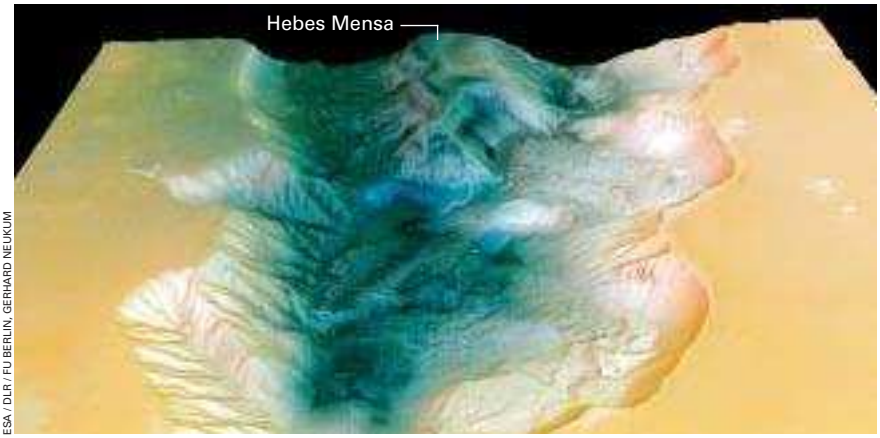
Schwefelhaltige Minerale sind aber nicht die einzigen Wasserspuren, die Omega gesichtet hat. An mehreren Orten stieß es auch auf so genannte Phyllosilikate – eine Mineralfamilie, zu der unter anderem die meisten Tone gehören. Für ihre Entstehung ist, zumindest auf der Erde, dauerhafter Kontakt zwischen flüssigem Wasser und dem ursprünglichen Magmagestein notwendig.

Möglicherweise fand dieser Kontakt in Wasser führenden Schichten unterhalb des Marsbodens statt. Wahrscheinlicher scheint jedoch eine chemische Verwitterung durch Oberflächenwasser – vorausgesetzt das Klima war damals warm genug. Jean-Pierre Bibring, Chefwissenschaftler des Omega-Instruments, nimmt an, dass das verwitterte Gestein anschließend von Lavaströmen bedeckt und später durch Erosion oder Meteoriteneinschläge wieder freigelegt wurde.

Fundorte der Phyllosilikate sind halbinselartige Gesteinsaufschlüsse in Syrtis Major oder in Niederungen auf der Nordhalbkugel wie Ismenius Lacus. Datierungen durch Abzählen der Krater im umliegenden Gelände deuten darauf hin, dass diese Minerale bereits in der Noachischen Periode entstanden, die vom Marsursprung vor 4,5 Milliarden bis vor etwa 3,8 Milliarden Jahre reicht. »Damals muss es einen aktiven Wasserkreislauf gegeben haben. Nur so lassen sich die großen Mengen an tonartigen Phyllosilikaten erklären«, sagt Bibring.

Obwohl die Sulfate auch nicht ohne Wasser entstehen können, benötigen sie keinen dauerhaften Kontakt mit dem nassen Element und bilden sich bevorzugt in einer chemisch sauren Umgebung. Außerdem hat Omega sie fast durchweg an anderen Stellen auf der Marsoberfläche entdeckt als die Phyllosilikate. Daraus schlossen Bibring und etliche Kollegen kürzlich in einem Beitrag für das Wissenschaftsmagazin »Nature« *(Bd. 438, S. 623)* auf zwei frühe klimatische Epochen, die sich deutlich vom heutigen Mars unterscheiden: eine erste wasserreiche Periode, gefolgt von einer Phase, in der das Gestein eher episodisch von säurehaltigem Wasser verändert wurde. Zu klären bleibt, was den damaligen Wechsel auslöste und wie es schließlich zur heutigen Trockenheit kam.

Der Tafelberg inmitten der Hebes-Schlucht entstand vermutlich, als aus einer Spalte an ihrem Grund vulkanisches Material explosiv herausgeschleudert wurde und seitlich wieder herabregnete. Dabei bildeten sich durch Einwirkung von heißem Wasser oder Dampf hydratisierte Sulfatminerale, die am Fuß des Bergs freiliegen.



ESA / DLR / FU BERLIN, GERHARD NEUKUM

Thorsten Dambeck ist promovierter Physiker und Wissenschaftsautor in Berlin.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Extremszenario abgesagt

Wenn sich die Kohlendioxid-Konzentration verdoppelt, steigt die Temperatur langfristig um bis zu vier Grad Celsius. Dass es noch wärmer wird, ist neuen Studien zufolge nicht zu erwarten.

Von Sven Titz

Wie stark wird sich die Erdatmosphäre erwärmen? Das ist eine der wichtigsten Fragen der aktuellen Klimaforschung. Doch an einer klaren Antwort beißen sich die Experten seit Jahrzehnten die Zähne aus. Schon 1979 hieß es in einem Report der US-amerikanischen National Academy of Sciences: Wenn sich der Kohlendioxidgehalt der Luft verdoppelt, steigt die globale Mitteltemperatur am Erdboden durch den zusätzlichen Treibhauseffekt um 1,5 bis 4,5 Grad Celsius. Diese Aussage beruhte damals noch weit gehend auf einer Schätzung von Experten. In den folgenden zwei Jahrzehnten wurde mit computergestützten Klimaszenarien immer wieder versucht, die Sensitivität des Klimas gegenüber einem CO_2-Anstieg genauer zu ermitteln. Ohne Erfolg: Das Intergovernmental Panel on Climate Change – das offizielle wissenschaftliche Gremium der Uno für Fragen des Klimawandels – nannte in seinem letzten großen Bericht von 2001 exakt die gleiche Spanne wie die US-Akademie 22 Jahre zuvor.

Erderwärmung um zehn Grad?

In der Folge nahm der Wertebereich zunächst sogar noch zu. Vor einem Jahr schreckte ein Forschungsbericht die Öffentlichkeit auf, wonach es nicht ausgeschlossen sei, dass sich die Erdoberfläche im Extremfall sogar um sage und schreibe zehn Grad Celsius erwärmen könnte *(Nature, Bd. 433, S. 403)*. Dieses Ergebnis basierte auf Tausenden von Klimasimulationen mit dem gleichen Computerprogramm. Dabei wurden die einzelnen Parameter, die innerhalb der Forschergemeinde umstritten sind, graduell variiert, um sämtliche Szenarien abzudecken, die nach aktuellem Wissensstand möglich sind.

Damit sich die Unmenge an Programmläufen überhaupt bewältigen ließ, verteilten die Forscher um David A. Stainforth von der Universität Oxford die Berechnungen häppchenweise per Internet auf die PCs gewöhnlicher Computernutzer. Das Projekt climateprediction.net läuft wegen des großen Erfolgs übrigens weiter.

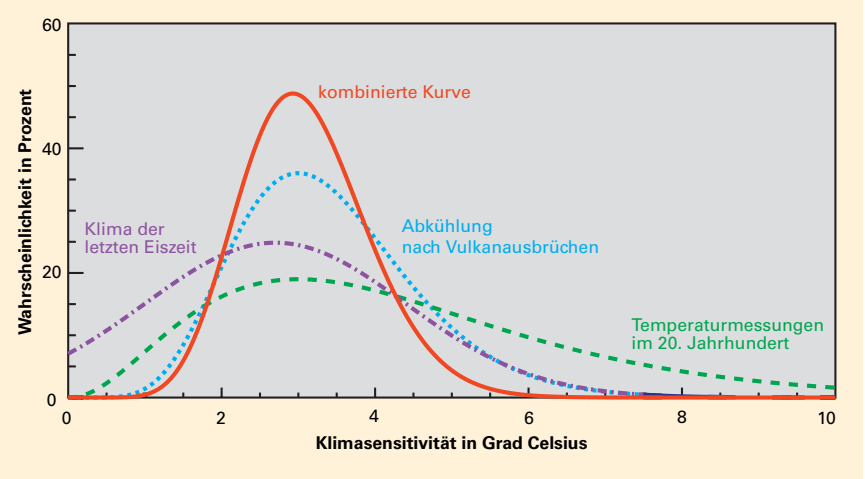
Viele Klimaexperten taten die zehn Grad rasch als unrealistischen Ausreißer und entsprechende Medienberichte als grobe Übertreibung ab. Doch in der Nachricht steckte ein Körnchen Wahrheit. Denn bis vor Kurzem wollte es den Klimaforschern partout nicht gelingen, hohe Aufheizungswerte von mehr als sechs Grad Celsius gänzlich auszuschließen. Für das Extremszenario blieb so ein beachtliches Restrisiko von rund fünf Prozent. Hauptunsicherheitsfaktor war und ist der Einfluss von atmosphärischem Staub (Aerosolen) und Wolken auf die Sonneneinstrahlung.

Doch jetzt scheint sich die Sensitivität endlich genauer eingrenzen zu las- ▷

USGS

Der Vulkan Pinatubo trübte bei seinem Ausbruch 1991 die Atmosphäre. Die leichte Abkühlung der Erde danach half experimentell genauer zu bestimmen, wie empfindlich das Klima auf Änderungen des Treibhauseffekts reagiert.

ANZEIGE



J.D. ANNAN UND J.C. HARGREAVES / GEOPHYS. RES. LETT. BD. 33, S. L06704

Indem Forscher die Ergebnisse von drei unabhängigen Untersuchungen mathematisch kombinierten, konnten sie den Schätzwert für die Empfindlichkeit des Erdklimas gegenüber einer Verdopplung des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre präzisieren. In den drei Studien waren der gemessene Temperaturanstieg im 20. Jahrhundert, die globale Abkühlung nach Vulkanausbrüchen und der Zusammenhang zwischen Temperatur und Sonneneinstrahlung während der letzten Eiszeit dazu benutzt worden, die Klimasensitivität zu bestimmen.

▷ sen. Mehr und mehr voneinander unabhängige Studien haben in den vergangenen zwei Jahren sehr ähnliche Ergebnisse geliefert und vor allem gezeigt, dass extrem hohe Werte so gut wie ausgeschlossen sind.

Eine ganze Palette von Methoden steht heutzutage für solche Untersuchungen zur Verfügung: Zum einen kann man versuchen, das Klima der vergangenen Jahrtausende – in der letzten Eiszeit oder im nachfolgenden Holozän – zu simulieren. Die damalige Intensität der Sonneneinstrahlung am Boden (Insolation) lässt sich unter anderem aus den Erdbahnparametern und den Ablagerungen historischer Vulkanausbrüche ableiten. Zugleich geben Eisbohrkerne, Baumringe und Sedimente Aufschluss über die ehemals herrschenden Temperaturen. Aus dem Vergleich beider Größen lässt sich auf die Empfindlichkeit des Klimas schließen. Das haben Thomas Schneider von Deimling und seine Kollegen am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung für den Höhepunkt der letzten Eiszeit getan. Auch die genauen Temperatur- und Strahlungsmessungen im 20. Jahrhundert eignen sich zur Bestimmung der Klimasensitivität. Gleiches gilt für die Abkühlungsreaktion auf Vulkanausbrüche wie den des Pinatubo *(Geophysical Review Letters, Bd. 32, L09702)*. Bei all diesen Untersuchungen zeigte sich, dass ein Temperaturanstieg um mehr als sechs Grad Celsius bei Verdopplung des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre kaum zu erwarten ist.

Zum Methodenarsenal gehören neuerdings auch Untersuchungen vom Weltraum aus. So kombinierten Piers Forster und Jonathan Gregory von der Universität Reading (Großbritannien) Satellitendaten des *Earth Radiation Budget Experiment* (Erbe) von 1985 bis 1996 mit Temperaturmessungen auf der Erde. Wegen der kurzen Zeitspanne blieb auch in diesem Fall eine relativ große Unsicherheit bestehen. Immerhin ließ sich die Empfindlichkeit des Klimas auf den Bereich zwischen ein und vier Grad Celsius eingrenzen *(Journal of Climate, Bd. 19, S. 39)*. Das ist umso bedeutsamer, als das Resultat ganz ohne Simulationen gewonnen wurde.

Hilfe von der Mathematik

Auch die Mathematik – genauer gesagt: die Wahrscheinlichkeitstheorie – kann helfen, den Wert für die Empfindlichkeit des Klimas zu präzisieren. Wenn unabhängige Untersuchungen ähnliche Ergebnisse mit einer gewissen Schwankungsbreite liefern, dann sollte deren Kombination eine geringere Gesamtfehlerspanne liefern. Die beiden britischen Klimaforscher James Annan und Julia Hargreaves, die am japanischen Frontier Research Center for Global Change in Yokohama arbeiten, machten sich dies zu Nutze. Sie verrechneten die Ergebnisse von drei besonders überzeugenden Arbeiten miteinander und konnten so die dort genannten Wertebereiche weiter einschränken *(Geophysical Research Letters, Bd. 33, L06704)*. Ihr Fazit lautet: »Sehr wahrscheinlich ist die Klimasensitivität kleiner als 4,5 Grad Celsius.« »Sehr wahrscheinlich« bezeichnet in der Sprache der Klimaforscher eine Wahrscheinlichkeit über 95 Prozent.

Wenn man Fachleute nach ihrer persönlichen Einschätzung fragt, reduziert sich der Höchstwert sogar noch etwas weiter. Als maximale Klimasensitivität werden heutzutage allgemein vier Grad genannt. Diese Obergrenze hält zum Beispiel auch Stefan Rahmstorf vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung für realistisch. Bei der Untergrenze hat sich in den vergangenen Jahren gleichfalls ein breiter Konsens gebildet: Kein anerkanntes Klimamodell liefert laut Rahmstorf eine Klimasensitivität unterhalb von zwei Grad. Der wahrscheinlichste Wert liegt, wie die Kombinationsstudie von Annan und Hargreaves ergab, genau in der Mitte: bei drei Grad Celsius.

Dies bedeutet nun aber nicht, dass sich die Atmosphäre synchron mit dem CO_2-Anstieg um diesen Betrag erwärmen wird. Der Sensitivitätswert lässt sich nicht einfach auf ein Klimaszenario für das 21. Jahrhundert übertragen – der tatsächliche Temperaturanstieg verläuft langsamer. Die drei Grad beziehen sich auf den Endpunkt der Erwärmung, der erst dann erreicht ist, wenn sich das Klima wieder im Gleichgewicht befindet. Weil der Ozean sehr träge reagiert, dauert das deutlich länger als hundert Jahre.

Durch die neuen Studien lassen sich nun zwar Extremszenarien ausschließen. Doch für praktische Zwecke wie die Klimavorhersage ist die Sensitivität immer noch nicht präzise genug bekannt. Es bleibt also nichts anderes übrig, als die bisherigen Methoden weiter zu verfeinern. Einen Königsweg gibt es offenbar nicht. Zu den aussichtsreichsten Ansätzen gehören sicherlich Vergleichsstudien mit variierten Modellparametern und Untersuchungen anhand von Strahlungsdaten, die per Satellit gemessen werden.

Sven Titz ist promovierter Meteorologe und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Die Antenne der Zelle

Haarähnliche Fortsätze an Zellen in der Niere galten lange als atavistisches Erbe aus der Frühzeit des Lebens. Jetzt zeigt sich, dass ohne sie Wachstum und Entwicklung nicht richtig funktionieren.

Von Carola Hanisch

Es ist eine uralte Erfindung der Evolution: Zilie oder Flagelle genannt, dient der härchenartige Fortsatz schon seit 1,5 Milliarden Jahren den einzelligen Geißel- und Wimpertierchen zur Fortbewegung. Auch beim Menschen übernimmt er eine ähnliche Aufgabe – als Spermaschwanz. Aber er kann noch viel mehr. So sind in unserem Körper bewegliche Zilien in großer Zahl auf der Oberfläche vieler Zellen aufgereiht. Im Gleichtakt schlagend, reinigen sie etwa als Flimmerhärchen die Lunge von Schleim, bewegen im Gehirn den Liquor und transportieren im Eileiter die Eizellen. Lange nicht für wichtig gehalten wurde, dass auch bei anderen Zellen manchmal einzelne Härchen reglos aus der Außenmembran ragen. Diese »Monozilien« galten bis vor Kurzem schlicht als nutzlose Überbleibsel aus der Frühzeit des Lebens.

Doch dann stießen Forscher um das Jahr 2000 auf eine Mausmutante namens orpk, die ein Analogon der polyzystischen Nierenerkrankungen beim Menschen entwickelt, einem der häufigsten schweren Erbleiden. Dabei bilden sich sackartige, flüssigkeitsgefüllte Erweiterungen der Harnkanäle. Außerdem ▷

ANZEIGE

Das urtümliche Geißeltierchen der Gattung *Chlamydomonas*, das zu den Grünalgen zählt, bewegt sich mit zwei Flagellen fort (unten). Ein Protein, das für den Aufbau und die Versorgung dieser haarartigen Fortsätze zuständig ist, kommt auch im Menschen vor – im Spermaschwanz ebenso wie in den Flimmerhärchen der Lunge (links) oder den so genannten Monozilien von Nierenzellen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

NACHGEHAKT

Der Wissenschaft einen Streich gespielt

Der neue Haushalt der Nasa stärkt die bemannte Raumfahrt sowie ausgewählte Großprojekte – auf Kosten kleinerer Vorhaben der Astronomie und der Klimaforschung.

Von Götz Hoeppe

Am 6. Februar gab die US-Weltraumbehörde Nasa ihre Finanzplanung für das Jahr 2007 bekannt. Zwar soll der Haushalt im Vergleich zum Vorjahr um 1,8 Prozent auf 16,8 Milliarden US-Dollar anwachsen. Dennoch werden mehrere Forschungsprojekte gestoppt. Begründung: Damit die Internationale Raumstation (ISS) bis 2010 fertig zusammengebaut werden kann, sind noch 17 Raumfährenflüge erforderlich. Zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen nach dem Absturz des Spaceshuttles Columbia im Februar 2003 haben die Kosten dafür um mehr als drei Milliarden Dollar in die Höhe getrieben.

Dieser Betrag wird großenteils vom Haushalt für die Grundlagenforschung abgezwackt. Das Entsetzen vieler Wissenschaftler ist groß – nicht nur, weil einige weit gehend fertig gestellte Satelliten und Flugzeuge auf dem Erdboden bleiben sollen, während mit dem Ausbau der ISS ein Projekt weitergeführt wird, das Experten seit Langem als wissenschaftlich kaum ergiebig kritisieren.

Steigt die Nasa damit aus der Wissenschaft aus? Dieser Verdacht drängt sich auf, wenn man sich an die Grundsatzrede erinnert, in der US-Präsident George W. Bush am 14. Januar 2004 die bemannte Raumfahrt zum Schwerpunkt der Nasa-Aktivitäten erklärte. Damals sprach er pathetisch von der Rückkehr zum Mond bis zum Jahr 2020 als Etappe auf dem Weg zum Mars. Diese Ziele sind wissenschaftlich so wenig motiviert, wie es das Wettrennen zum Mond in den 1960er Jahren war.

Auch internationale Projekte stehen dafür nun auf der Streichliste oder werden neu begutachtet. Neben dem Gravitationswellen-Observatorium Lisa, das gemeinsam mit der europäischen Raumfahrtbehörde Esa geplant war, trifft der Rotstift auch die erwartete Fusion der Planeten-Such-Teleskope TPF (Nasa) und Darwin (Esa). Prominentestes Opfer aus deutscher Sicht ist Sofia. Dieses zur Sternwarte umgebaute Verkehrsflugzeug vom Typ Boeing 747 – ein Gemeinschaftsprojekt der Nasa mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) – trägt ein 2,7-Meter-Teleskop für Beobachtungen des mittleren und fernen Infrarotlichts, das von der Erdatmosphäre weit gehend verschluckt wird. Astronomen wollen mit Sofia junge Galaxien im fernen Universum sowie in Gas und Staub gehüllte Geburtsstätten von Sternen und Planeten erforschen.

Kurz vor der zum Jahresende geplanten Inbetriebnahme des Teleskops kommt der einseitige Ausstieg des amerikanischen Partners für die Deutschen völlig überraschend. 400 Millionen Euro der Nasa und 80 Millionen Euro der DLR, die bisher ausgegeben wurden, müssten in den Wind geschrieben werden.

Ein Argument der Nasa-Führung war zunächst, man wolle sich mehr auf zukunftsorientierte Projekte konzentrieren. Ist Sofia etwa veraltet? Wohl kaum. Auf den Nutzen des Teleskops angesprochen, geraten Astronomen ins Schwärmen. Keiner der existierenden und geplanten Infrarotsatelliten kommt Sofia in der Breite des untersuchten Spektralbereichs und der Vielfalt an Messgeräten gleich. Diese können zudem während der gesamten Betriebszeit von zwanzig Jahren laufend problemlos gegen neue ausgetauscht werden. Dagegen ist die Technik von Satelliten wegen der langen Entwicklungszeiten schon beim Start überholt.

Hinzu kommt, dass man Sofia nur als Schnäppchen bezeichnen kann. Das James Webb Space Telescope (JWST), das als Flagschiff des Nasa-Wissenschaftsprogramms fast ohne Schrammen durch die Sparoperation gekommen ist, wird nach neuesten Schätzungen fast das Zehnfache verschlingen: 4,5 Milliarden US-Dollar. Dieser offizielle Nachfolger des Hubble-Weltraumobservatoriums soll mit seinem 6,5-Meter-Teleskop ebenfalls im Infraroten beobachten – zwar schärfer und empfindlicher als Sofia, dafür aber in einem anderen Ausschnitt des Spektrums. Seine veranschlagten Kosten haben sich innerhalb von fünf Jahren verfünffacht. Wurde das JWST zu schnell zu teuer, um noch gestrichen zu werden? Hinter vorgehaltener Hand munkeln Insider, dass es längst Usus geworden ist, die Kosten anfangs bewusst zu unterschätzen, um ein Großprojekt auf den Weg zu bringen. Die Ehrlichen sind die Dummen – und wieder einmal sind das die Betreiber kleinerer Projekte.

Dabei hat WMAP gerade erst bewiesen, wie erfolgreich eine spezialisierte Mission sein kann. Trotz vergleichsweise bescheidener Kosten von 140 Millionen US-Dollar verhalf der Nasa-Satellit für die Kartierung der kosmischen Hintergrundstrahlung den beteiligten Wissenschaftlern zum meistzitierten astronomischen Artikel des vergangenen Jahrzehnts. Auf den zweiten Datensatz, der Mitte März veröffentlicht wurde, haben Kosmologen seit Jahren mit Spannung gewartet.

Kein Wunder also, dass der Trend zu Großprojekten die Gemeinde der Astronomen polarisiert. Nach Überzeugung der einen lassen sich viele Fragen nur mit spezialisierten Sonden beantworten. Andere behaupten dagegen, dass alle Bereiche der Astronomie letztlich von einem Gerät wie dem Weltraumteleskop Hubble profitieren – was die bisherigen Kosten von mehr als zwölf Milliarden US-Dollar rechtfertige.

Noch könnte Sofia gerettet werden. Die DLR hat eine Prüfung der Kosten- und Zeitplanung durchgesetzt, die Ende März abgeschlossen war. Wenn das Repräsentantenhaus in diesem Frühjahr über den Haushalt berät, könnte das Gutachten helfen, der Nasa-Führung einen Strich durch die Rechnung zu machen. In jedem Fall aber werden sich internationale Partner in Zukunft genauer überlegen müssen, welches Vertrauen sie noch in die Nasa setzen.

Götz Hoeppe

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

▷ kann die Niere bis zum Doppelten ihrer normalen Größe anwachsen (Bild).

Wie es zu den Zysten kommt, lag bis vor Kurzem im Dunkeln. Untersuchungen an der orpk-Maus zeigten nun aber, dass das Gen, das bei ihr verändert ist, in ganz ähnlicher Form auch in der einzelligen Grünalge *Chlamydomonas* vorkommt, die zu den Geißeltierchen zählt. Dort kodiert es ein Transportprotein, das für den Aufbau und die Versorgung der Flagellen zuständig ist.

Verbindung zwischen Zilie und Zyste

Auch die Tubuluszellen der Niere tragen Geißeln, die in die Harnkanälchen hineinragen. Deshalb lag es nahe, sie bei der orpk-Maus näher in Augenschein zu nehmen. Und tatsächlich – die Härchen waren verkümmert. So tat sich völlig überraschend ein Zusammenhang zwischen Zilie und Zyste auf. Er hat sich in der Folge bestätigt: Die Produkte sämtlicher Gene, die bei den verschiedenen polyzystischen Nierenerkrankungen mutiert sind, haben entweder eine Funktion in der Zilie oder an deren Basis.

Bei Erbleiden, die mit Zysten in der Niere einhergehen, treten in der Regel weitere Störungen in anderen Organen auf: in Leber, Bauchspeicheldrüse, Augen, Nase, Gehirn und Atemwegen. Zudem kommt es zu Fehlbildungen wie überzähligen Fingern oder Zehen. Zilien, so wurde plötzlich klar, sind nicht nur in der Niere wichtig, sondern üben Schlüsselfunktionen in einer Vielzahl von Organen und Geweben aus.

Was aber ist die Aufgabe dieser unbeweglichen Härchen? Mit dieser Frage beschäftigt sich eine wachsende Forscherschar. Für die Niere wurde bald eine Antwort gefunden. Demnach fungieren die Härchen hier während der Embryonalentwicklung als Sensoren, die den ersten Harnfluss »messen«. Wenn sie durch die vorbeiströmende Flüssigkeit umgebogen werden, strömt Kalzium ein, was über verschiedene Zwischenschritte das weitere Wachstum reguliert. Bleibt dieses Signal aus, wächst die Niere unkontrolliert weiter und entwickelt schließlich Zysten.

Auf welchem Weg die Botschaft übermittelt wird, war zunächst noch unklar. Kürzlich konnten Gerd Walz und seine Mitarbeiter von der Universitätsklinik Freiburg jedoch zeigen, dass ein Gen namens Inversin, dessen Mutation zur Zystenniere führt, in die so genannte Wnt-Kaskade eingreift *(Nature genetics, Bd. 37, S. 537)*. Diese Signalkette zählt zu den wichtigsten Steuermechanismen in der Embryonalentwicklung.

Inversin verdankt seinen Namen der Eigenschaft, dass es – in mutierter Form – nicht nur Nierenzysten, sondern ▷

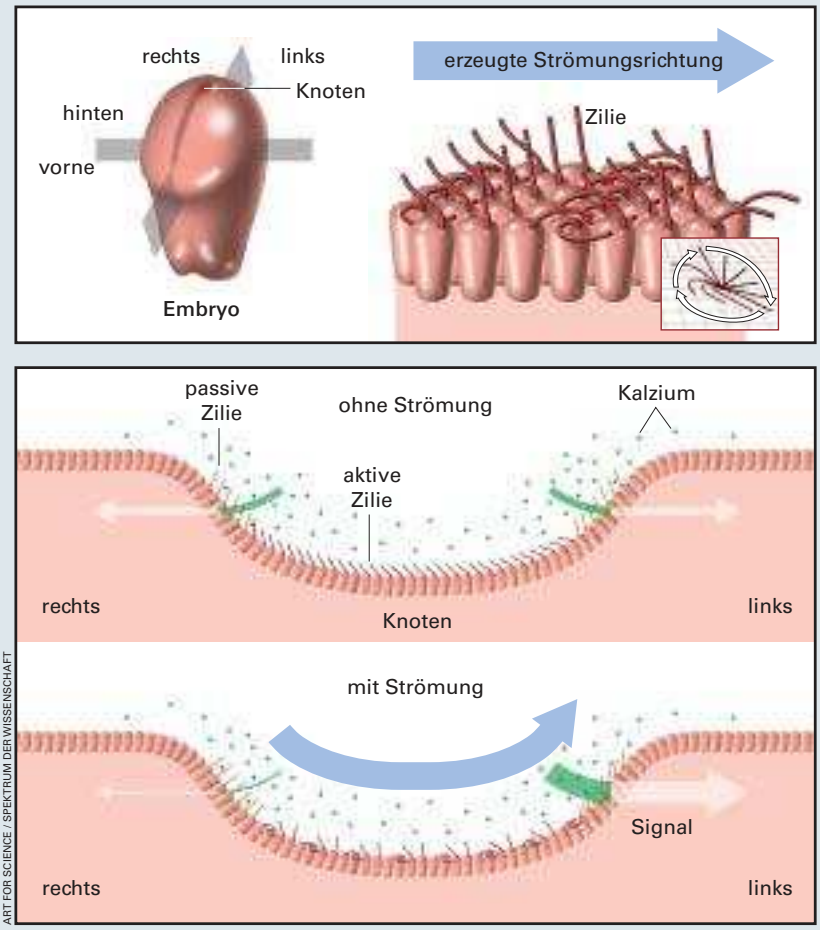
Bei polyzystischen Nierenerkrankungen – einem der häufigsten schweren Erbleiden des Menschen – entstehen sackartige, flüssigkeitsgefüllte Erweiterungen der Harnkanäle. Außerdem ist die Niere krankhaft vergrößert. Ursache sind verkümmerte Monozilien durch eine Mutation im selben Gen, das bei Geißeltierchen für die Bildung der Flagellen notwendig ist.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

ANZEIGE

Anlage der Körperasymmetrie

Monozilien legen im frühen Embryonalstadium die Basis für die Links-rechts-Asymmetrie des Körpers. Auf dem so genannten Knoten erzeugen sie durch ihre propellerartige Bewegung eine gerichtete Strömung (links). Diese transportiert mit Botenmolekülen gefüllte Bläschen und biegt passive Härchen auf der linken Seite zu ihrem Zellkörper hin, auf der rechten dagegen von ihm weg (rechts). Links wird so der Kalziumeinstrom verstärkt, rechts dagegen gedrosselt.



ART FOR SCIENCE / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

▷ auch den so genannten Situs inversus verursacht. Dabei liegen einseitige Organe wie Herz oder Leber in der falschen Körperhälfte. Wie diese Anomalie mit Nierenzysten zusammenhängt, war lange rätselhaft. Doch nun hat sich herausgestellt, dass Zilien in der frühesten Embryonalentwicklung für die erstmalige Unterscheidung von rechts und links zuständig sind (siehe Kasten oben).

Diese Aufgabe übernehmen Härchen auf einer embryonalen Struktur namens Knoten, die sich wie kleine Propeller synchron im Kreis drehen. Dadurch rufen sie eine Strömung der extrazellulären Flüssigkeit hervor. Nach der gängigen Hypothese biegt diese die Zilien, die passiv am Rand des Knotens sitzen, auf der linken Seite zum Zellkörper hin, auf der rechten dagegen von ihm weg. Im ersten Fall wird der Kalziumeinstrom verstärkt, im zweiten gedrosselt. So kommt es nur auf der einen Seite des Knotens zu einem Signal, das für das Ablesen bestimmter Gene sorgt. Diese asymmetrische Expression bildet den Keim der Links-rechts-Asymmetrie des Körpers.

Offenbar können Zilien aber nicht nur Strömungen auslösen und erkennen, sondern auch wie Miniaturantennen Signalmoleküle aus der Umgebung aufnehmen und weiterleiten. Zum Beispiel werden, wie Nobutaka Hirokawa und seine Mitarbeiter an der Universität Tokio nun entdeckten, im Knotenfluss winzige membranumhüllte Pakete transportiert. Sie enthalten unter anderem das Signalmolekül *sonic hedgehog (Nature, Bd. 435, S. 172)* und setzen es auf der linken Seite des Knotens frei. Außerdem wies eine Gruppe um Jeremy Reiter von der Universität von Kalifornien in San Francisco kürzlich das Molekül *smoothened* in der nodalen Zilie der Maus nach – ein bekanntes Glied in der *Hedgehog*-Signalkette *(Nature, Bd. 437, S. 1081)*. Seine Gegenwart ist, wie die Forscher zeigen konnten, für die korrekte Funktion des Knotens unerlässlich.

Spiegelverkehrtes Herz und überzählige Finger

Demnach können Zilien sowohl in den Wnt- als auch den *Hedgehog*-Signalweg eingreifen. In welchem Ausmaß das geschieht, ist noch unklar. Es gibt allerdings kaum Wachstums- und Entwicklungsprozesse, an denen diese beiden Signalketten nicht beteiligt sind. Auf jeden Fall erscheinen die vielen verschiedenen Symptome von Zilienerkrankungen nun verständlich.

Ein weiteres Beispiel ist das Oral-facial-digital-Type1-Syndrom – ein Erbleiden, das mit Missbildungen im Gesichtsschädel, überzähligen Fingern und Nierenzysten einhergeht. Brunella Franco und ihre Mitarbeiter an der Universität Neapel haben jüngst Mäuseembryonen untersucht, denen das für die Krankheit verantwortliche Gen Ofd1 fehlte *(Nature Genetics, Bd. 38, S. 112)*. Dabei zeigte sich, dass es für die Bildung von Zilien in der Niere und am Knoten nötig ist – und für eine korrekte Ausbildung der Links-rechts-Achse: Bei den mutanten Mäusen war das Herz spiegelverkehrt angelegt.

Ein unscheinbares Härchen hat sich somit als zentrale Schaltstelle bei vielen Entwicklungsprozessen entpuppt. »Die Zilie ist ein abgeschlossenes, sehr komplexes Organell«, weiß Heymut Omran von der Universität Freiburg, der sich seit vielen Jahren mit ihr beschäftigt. Das breite Spektrum ihrer Aufgaben im menschlichen Körper aufzuklären, wird noch eine Menge Detailarbeit erfordern. Viel lernen können die Forscher dabei von der bestuntersuchten Zilie der Welt: der Geißel von *Chlamydomonas*. Denn der Mensch ist von der Alge gar nicht so weit entfernt, wie es scheint.

Carola Hanisch ist Diplomchemikerin und freie Wissenschaftsjournalistin in Freiburg.

Springers
EINWÜRFE

von Michael Springer

Forschungsinstitut für letzte Fragen

Woher kommen wir? Wer sind wir? Wohin gehen wir? Die berühmten letzten Fragen fallen in die Zuständigkeit der Philosophie. Damit wird den Berufsdenkern eine unbequeme Klemmstellung zwischen den Stühlen der Naturwissenschaftler und der Theologen zugewiesen. Diesseitsforscher meiden solche Fragen tunlichst, und Jenseitskundlern ist die Antwort längst zuteil geworden. Den armen Philosophen bleibt die undankbare Aufgabe, in die Lücke zu springen und ernsthaft nachzusinnen über Themen wie den Urgrund des Seins, die Existenz des Nichts, die Nichtigkeit der Existenz, das Wesen der Wirklichkeit oder das Problem der Wahrheit.

Diese ohnehin unwirtliche ökologische Nische ist akut bedroht, seit Naturwissenschaftler zunehmend ihre traditionelle Zurückhaltung aufgeben und Gefallen an typisch philosophischen Spekulationen finden. Soeben haben sie gar ein eigenes Institut für grundlegende Fragen gegründet. Das Foundational Questions Institute (FQXi) mit Max Tegmark als wissenschaftlichem Direktor will sich nach Auskunft der Homepage (www.fqxi.org) auf Grenzfragen von Physik und Kosmologie konzentrieren. Treue Spektrum-Leser werden in der provisorischen Themenliste Ideen aus Tegmarks Artikel »Paralleluniversen« (Spektrum der Wissenschaft 8/2003, S. 34) wiederfinden: Was war vor dem Urknall? Ist unser Universum das einzige oder gibt es unendlich viele? Was wird schlussendlich aus dem All?

Das sind legitime naturwissenschaftliche Fragen, solange man daraus empirisch nachprüfbare Konsequenzen herleiten kann, etwa mögliche Spuren in der kosmischen Hintergrundstrahlung. Andere FQXi-Fragen lassen sich (noch) nicht empirisch entscheiden, werden aber unter Wissenschaftstheoretikern schon lange diskutiert: die Interpretation des Messproblems der Quantenphysik zwischen Kollaps der Zustandsfunktion und Vielweltentheorie oder die mutmaßliche Form einer künftigen Vereinigung von Quanten- und Gravitationstheorie.

Eine dritte Themensorte umfasst jedoch rein naturphilosophische Fragen, und hier fallen auch die letzten Hemmungen. Beispielsweise will FQXi wissen: Was bestimmt darüber, was existiert? Wie wirklich ist die Welt der Mathematik – und wie wirklich die der Materie? Ist Leben allgegenwärtig im Universum (oder darüber hinaus)? Wie verursacht die Materie Bewusstsein – oder kann sie das vielleicht gar nicht?

Anschubfinancier des Instituts ist die Templeton Foundation, eine private Stiftung, die sich der Förderung der Beziehungen zwischen Religion und Naturwissenschaft verschrieben hat. Wohl ihr zuliebe ist auf der FQXi-Homepage von »religiösen Glaubenssystemen« und »spirituellen Implikationen« die Rede, welche von den zitierten Fragen tangiert würden.

Im wissenschaftlichen Beirat sitzen theoretische Physiker und Kosmologen von Weltrang. Sie sollen Forschungsanträge bewerten und genehmigen, die sich weit über die Grenzen des empirisch Prüfbaren hinaus und tief hinein in den Bereich der letzten Fragen wagen.

Mir scheint dies ein Spiel mit zwei Gewinnern und einem Verlierer: Die geförderten Naturforscher bekommen Geld und Zeit für exotische bis esoterische Fragestellungen; die Religion gewinnt Renommee als anerkannter Gesprächspartner der allermodernsten Wissenschaft; die bedrängte Philosophie aber soll sich damit abfinden, dass sie bald nur noch ernst genommen wird, wenn sie ihre letzten Fragen in naturwissenschaftlicher Verkleidung vorbringt.

ANZEIGE

Rasanter Riesenwuchs bei Dinosauriern

Sie wuchsen anders als die meisten Reptilien – nämlich wie Warmblüter vor allem in der Jugend.

Von John R. Horner, Kevin Padian und Armand de Ricqlès

Reptilien wachsen langsam – dafür aber lebenslang. Und manche werden uralt. Dinosaurier, so glaubten die Paläontologen früher, benötigten sehr viele Jahre, bis sie zu den Giganten herangewachsen waren, unter deren Skeletten ein Mensch aufrecht stehen kann. Der zweibeinige, räuberische *Tyrannosaurus rex* überragte aufgerichtet die größten Elefanten. Die Pflanzen fressenden Brachiosaurier (siehe Bild rechts) hatten Ausmaße wie heutige große Wale.

Aber handelte es sich bei solchen Riesen tatsächlich um lauter Methusalems? Kein heutiges Reptil gewinnt auch nur annähernd eine solche Größe. Wie schnell wuchsen die Dinosaurier wirklich? Und wie alt konnten sie werden?

Viele Vorstellungen über die Riesenechsen prägte der namhafte englische Paläontologe Richard Owen (1804–1892). Er schuf 1842 das Wort »Dinosaurier« als Gruppenbezeichnung für einige merkwürdige, damals der Wissenschaft noch wenig bekannte gigantische Reptilien, die seines Erachtens auf dem Land gelebt hatten. Deswegen wollte er sie von den auch schon gefundenen Fisch- und Flugsauriern unterscheiden, die ebenfalls sehr groß wurden.

Nach Owen hoben sich die Dinosaurier von landläufigen Kriechtieren durch einige anatomische Besonderheiten ab. Zum Beispiel standen die Beine bei ihnen unterhalb des Rumpfs, nicht seitlich. Andere Merkmale schienen sie dennoch als Reptilien zu kennzeichnen – etwa die Form von Knochen und Gelenken der Beine und die Muskelansätze an den Knochen. Owen war darum überzeugt, dass sie gleichfalls wechselwarme Wesen mit einem trägen Stoffwechsel darstellten, die ihre Körpertemperatur nicht selbst aufrechterhalten konnten. Noch bis in die 1960er Jahre galten die Dinosaurier als behäbige Tiere, die sich schwerfällig durch eine ihnen zuträgliche warme Welt schleppten. Im von ihnen beherrschten Erdmittelalter konnten sie sich viel Zeit lassen, im Lauf eines langen Lebens groß und größer zu werden.

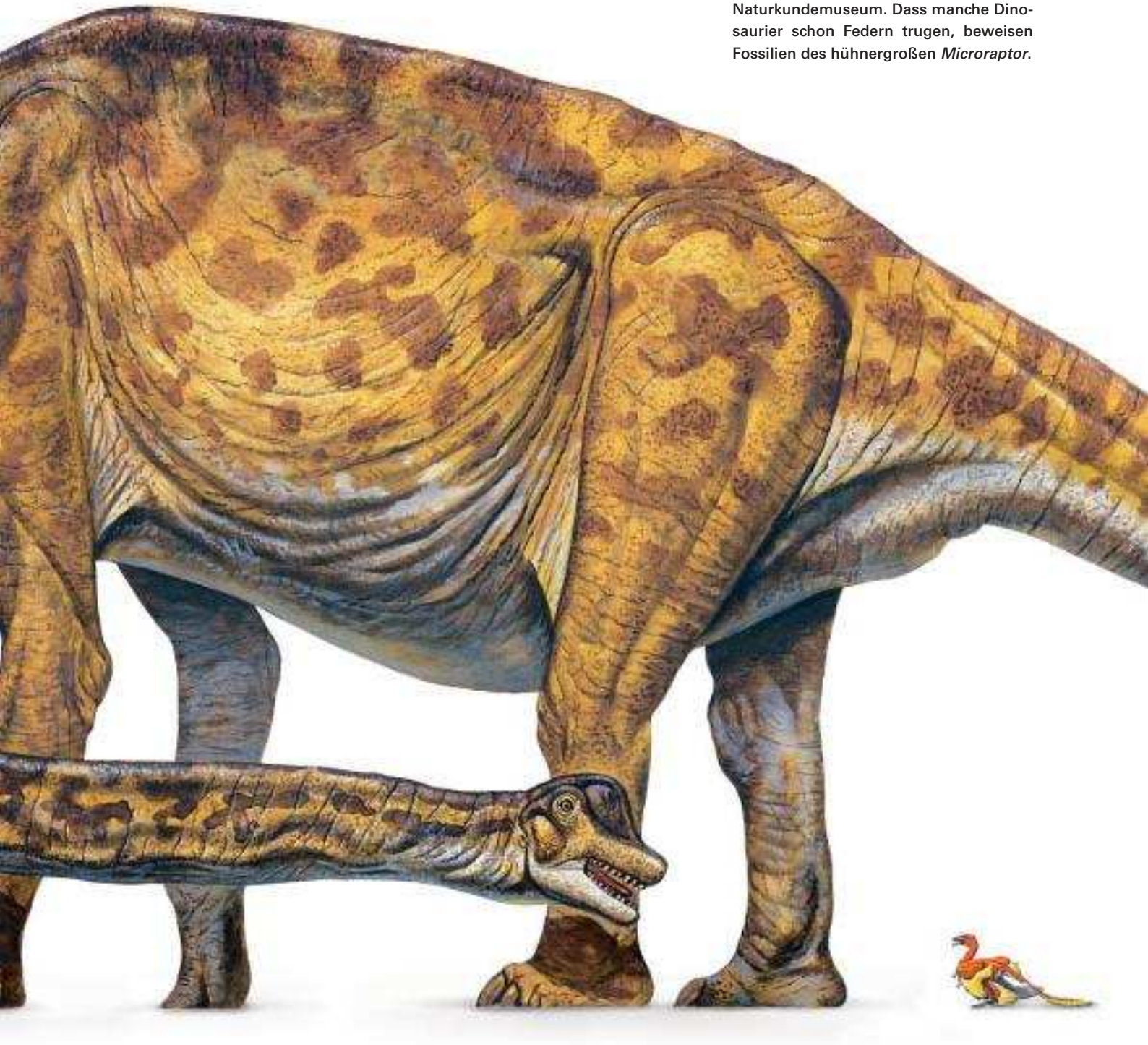
Die Paläontologen hätten es längst besser wissen können, hätten sie nur die Knochenfossilien genauer von innen angeschaut. Dass sich in Querschnittspräparaten von Dinosaurier-Schienbein- oder Oberschenkelknochen Wachstumslinien abzeichnen, die irgendwie an die ▷

MARK HALLETT

IN KÜRZE

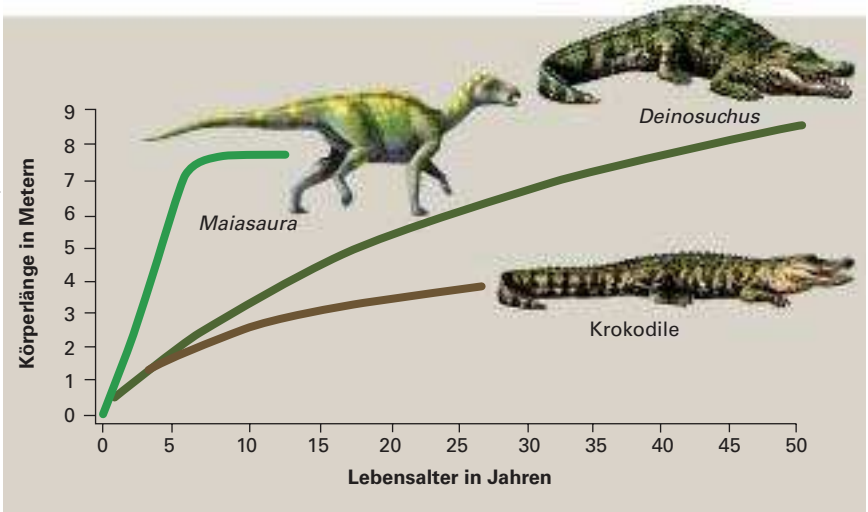
▶ Erst neuerdings lernten Paläontologen, wie sie an einem **Dinosaurierfossil** das Lebensalter des Tiers bestimmen können: Es lässt sich anhand von **Wachstumslinien** in den Knochen abschätzen.

▶ Dinosaurier gewannen ihre Körpergröße offenbar hauptsächlich in jungen Jahren. Knochenmustern zufolge wuchsen Reptilien in dieser Phase ungewöhnlich schnell. Bei vielen hörte dann die Größenzunahme plötzlich praktisch auf. Beides erinnert an **Wachstumsmuster von warmblütigen Tieren**.



Kaum zwanzig Jahre brauchte ein *Brachiosaurus*, bis er ausgewachsen war. Ein 23 Meter langes Skelett steht im Berliner Naturkundemuseum. Dass manche Dinosaurier schon Federn trugen, beweisen Fossilien des hühnergroßen *Microraptor*.

ILLUSTRATIONEN: SHAWN GOULD; DIAGRAMM: JEN CHRISTIANSEN



Diese Wachstumskurven zeigen es: Die Dinosaurier wuchsen in der Jugend rapide, was dann früh aufhörte. Andere Reptilien wachsen langsam ihr Leben lang.

▷ Jahresringe in Baumscheiben erinnern, war eigentlich schon einige Zeit bekannt. Doch erst vor ein paar Jahrzehnten begannen Forscher solche Knochenmuster genauer zu untersuchen.

Offenbar stellen jene Wachstumslinien tatsächlich Jahresmarken dar. Trotzdem kann man sie nicht einfach zählen wie bei Bäumen. Das Kernholz eines Baumstamms ist tot. Nur die äußeren Schichten leben und wachsen. Insofern bleiben einmal ausgebildete Strukturen erhalten – falls sie sich nicht bei manchen alten Bäumen zersetzen.

Ein Knochen lebt dagegen auch im Innersten. Er ist von Blutgefäßen und Nerven durchzogen, birgt lebende Zellen und wird auch nachträglich, und zwar lebenslang, wieder ab- und umgebaut, und das Material wird neu verwendet. Was alles in einem Knochen ständig geschieht und Spuren hinterlassen kann, sei hier nur knapp angedeutet. Für den Abbau älterer Knochenschichten sorgen spezielle große Fresszellen, die Osteoklasten. Sie höhlen zum Beispiel einen Langknochen in der Mitte aus. Das bringt Raum für das Knochenmark mit seinen wichtigen Aufgaben wie der Bildung von Blutzellen.

Auch der Aufbau neuen Knochengewebes erfolgt lebenslang. Nicht nur außen werden Schichten angelagert, sondern auch im Innern sorgen spezielle Zellen für neue, sekundäre Knochensubstanz. Dabei verschwinden oft die ältesten, innersten Knochenpartien und damit auch die Wachstumslinien aus der frühen Jugend. Präpariert man Scheiben von einem Dinosaurierknochen, sieht man daran folglich nur einen Teil – nur die spätesten – der Jahreslinien.

Lesen in den Knochenstrukturen

Die Paläontologen wissen sich aber zu helfen, um dennoch das Lebensalter eines Tiers zu rekonstruieren. Günstig ist es, wenn unter den Fossilien einer Art auch welche von offensichtlich jüngeren Individuen sind. Dann lässt sich, etwa anhand von Überschneidungen der Linien, zurückverfolgen, wie die Knochen wohl in jüngerem Alter weiter innen aussahen. Man erkennt, wie viele Linien bei dem älteren Tier fehlen und kann die Gesamtspanne der Jahreslinien nachvollziehen.

Oft gibt es aber keine Fossilien von Halbwüchsigen oder Jungtieren. Für solche Fälle haben die Forscher Verfahren entwickelt, nachträglich anhand der Abstände zwischen den außen noch vorhandenen Wachstumslinien weitere Linien praktisch nach innen hochzurechnen. Auch diese Vorgehensweise bringt plausible Ergebnisse. Wir haben diese Methode auf Skelette von *Tyrannosaurus rex* angewandt. Von dem kolossalen zweibeinigen Räuber besitzt das Museum of the Rockies an der Montana State University in Bozeman ein Dutzend Exemplare. Bei sieben davon sind Langknochen der Hinterbeine so gut erhalten, dass wir Material für mikroskopische Dünnschliffe entnehmen konnten.

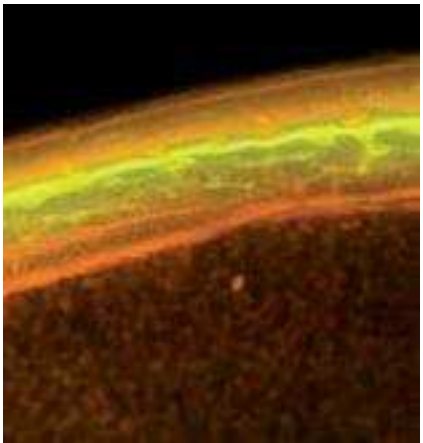
Zu unserem Erstaunen zeichnen sich an diesen Präparaten lediglich noch die äußeren vier bis acht Wachstumslinien ab. Von den älteren Linien ist nichts mehr zu sehen, denn weiter innen fand sich nur sekundäres Knochengewebe. Noch mehr wunderten wir uns über die beträchtliche Größe der Markhöhle: Sie ersetzte etwa zwei Drittel aller ursprünglichen Knochenmasse.

Das Faszinierendste war allerdings Folgendes: Bei einigen dieser Fossilien wurden die Abstände zwischen den äußersten Linien nach außen hin plötzlich ganz eng. Das Phänomen kannten wir schon von anderen Dinosauriern, beispielsweise vom Pflanzen fressenden Entenschnabeldinosaurier *Maiasaura* (siehe Bild oben). Solch ein Muster dürfte bedeuten, dass das Tier nun seine volle Größe erreicht hatte und nicht oder fast nicht mehr weiter wuchs. Manche Forscher vermuten, dass der Übergang zugleich die Geschlechtsreife kennzeichnet.

Unseren Berechnungen zufolge benötigte *T. rex* bis dahin 15 bis 18 Jahre. Dann hatten die Bestien aufgerichtet eine Höhe von sechs und eine Länge von elf Metern erreicht, bei drei Meter Hüfthöhe und fünf bis acht Tonnen Gewicht. Unabhängig von unserer Studie kamen Gregory M. Erickson von der Florida State University in Tallahassee und seine Kollegen etwa gleichzeitig zu einem ähnlichen Ergebnis. Mit Fug und Recht darf man da von einem rasanten Wachstum sprechen. Kein heutiges Reptil wächst auch nur entfernt so schnell.

Selbst die Riesenkrokodile der Kreidezeit lagen daneben weit zurück (siehe Bild oben). *Deinosuchus* zum Beispiel benötigte für zehn bis elf Meter Körperlän-

JACQUES CASTANET



Grün, gelb beziehungsweise orange fluoreszierende Farbstoffe wurden einer jungen Stockente jede Woche injiziert. Sie markieren die nacheinander gebildeten Knochenschichten und zeigen so das wöchentliche Wachstum an.

ge fünfzig Jahre. Das erkannten Erickson und Christopher A. Brochu von der University of Iowa in Iowa City an Wachstumslinien des Knochenpanzers am Hals dieser Riesen. Jene Krokodile lebten vor rund 80 bis 75 Millionen Jahren – also noch während des Dinosaurierzeitalters, das vor knapp 65 Millionen Jahren zu Ende ging. *Tyrannosaurus rex* wuchs insgesamt sogar schneller als der Afrikanische Elefant, der vergleichbare fünf bis sechseinhalb Tonnen Gewicht erst mit 25 bis 35 Jahren erreicht.

Schnell erwachsen werden

Dabei stach *T. rex* nicht einmal besonders hervor. Der zwei bis drei Meter lange Pflanzenfresser *Massospondylus* benötigte etwa 15 Jahre, um seine Endmaße zu erreichen – laut Anusuya Chinsamy-Turan, jetzt an der Universität Kapstadt. *Psittacosaurus*, ein früher, kleiner Horndinosaurier aus der Mongolei, war mit 13 bis 15 Jahren ausgewachsen, einer Arbeit von Erickson und Tatanya A. Tumanova vom Paläontologischen Institut in Moskau zufolge. Besonders schnell wuchs *Maiasaura*: Wir schätzen, dass dieser Entenschnabeldinosaurier schon mit sieben bis acht Jahren seine erwachsene Größe von sieben Metern erreichte.

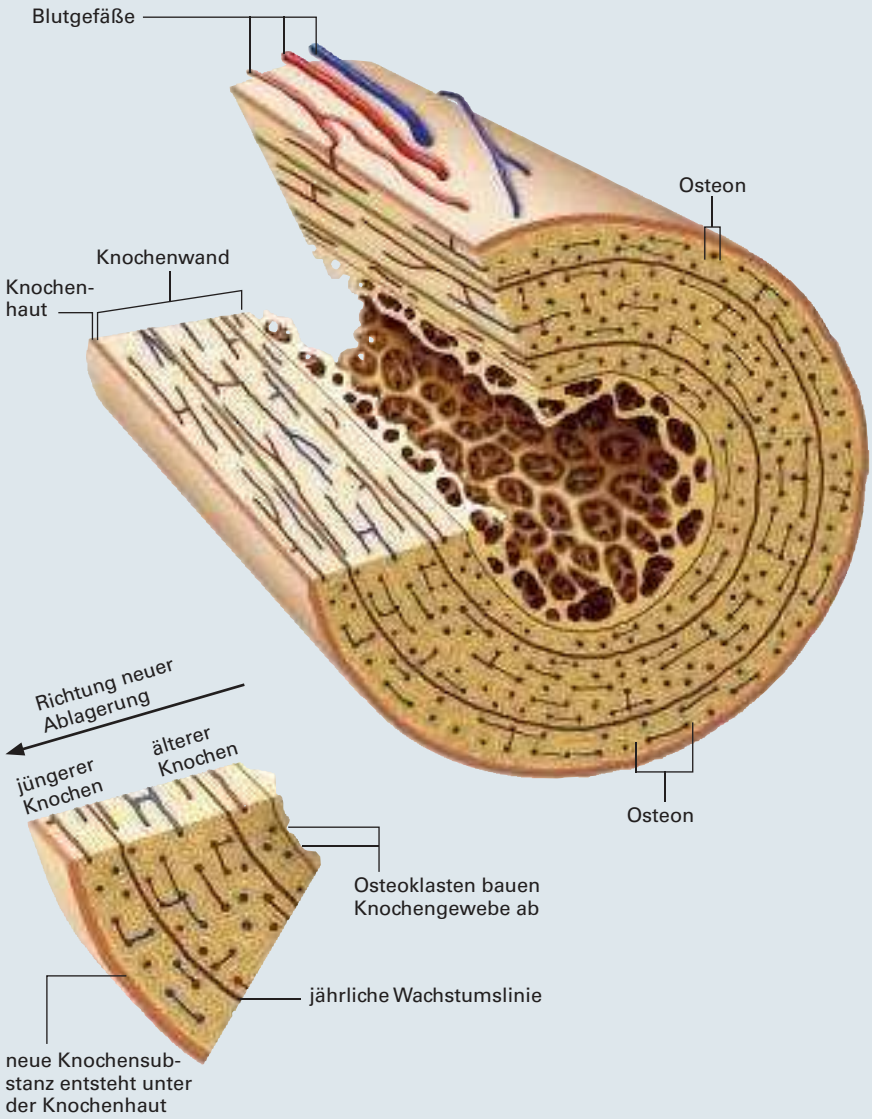
Enorm schleunig wuchsen die gewaltigen Sauropoden – die Elefantenfußdinosaurier mit kleinem Kopf auf einem extrem langen Hals, langem Schwanz und vier stämmigen, kurzen Beinen (siehe Bild S. 26/27). Martin Sander von der Universität Bonn untersuchte von dieser Gruppe den afrikanischen Titanosaurier *Janenschia*, der bis zu 24 Meter lang wurde und dann schätzungsweise 33 Tonnen wog. Dieser Gigant dürfte nach den Analysen bereits mit etwa elf Jahren geschlechtsreif gewesen sein, wuchs danach aber noch um einiges.

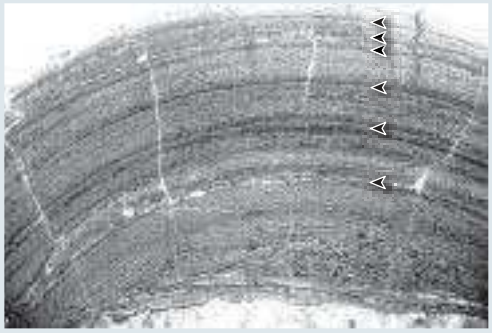
Auch andere Sauropoden beeilten sich außerordentlich. *Lapparentosaurus* aus Madagaskar, der vielleicht 15 Meter Länge maß, brauchte keine 20 Jahre, wie Frédérique Rimblot-Baly und ihre Kollegen von der Université Paris VII feststellten. Die Donnerechse *Brontosaurus* (heute *Apatosaurus* genannt), 18 Meter lang, 14 Meter hoch und 30 Tonnen schwer, war wohl mit acht bis zehn Jahren geschlechtsreif. Die Studie von Kristina Curry Rogers vom Science Museum of Minnesota in St. Paul ermittelte auch, dass so ein Tier jährlich fast fünfeinhalb Tonnen zulegte. ▷

Wachstumsspuren in Knochen

Die Wachstumslinien im Außenbereich langer Dinosaurierknochen verraten manches über das Lebensschema dieser außergewöhnlichen Reptilien. Dazu muss man wissen, dass neue Ringe stets außen angelagert werden. Um die Versorgungskanäle herum bilden sich dabei Osteonen, die Grundelemente von Knochen. Sie bestehen aus konzentrisch angeordneten feinen Lamellen.

Innen wird die ursprüngliche Knochensubstanz ab- und teils neu aufgebaut. Die frühen Wachstumslinien fehlen deswegen oft.

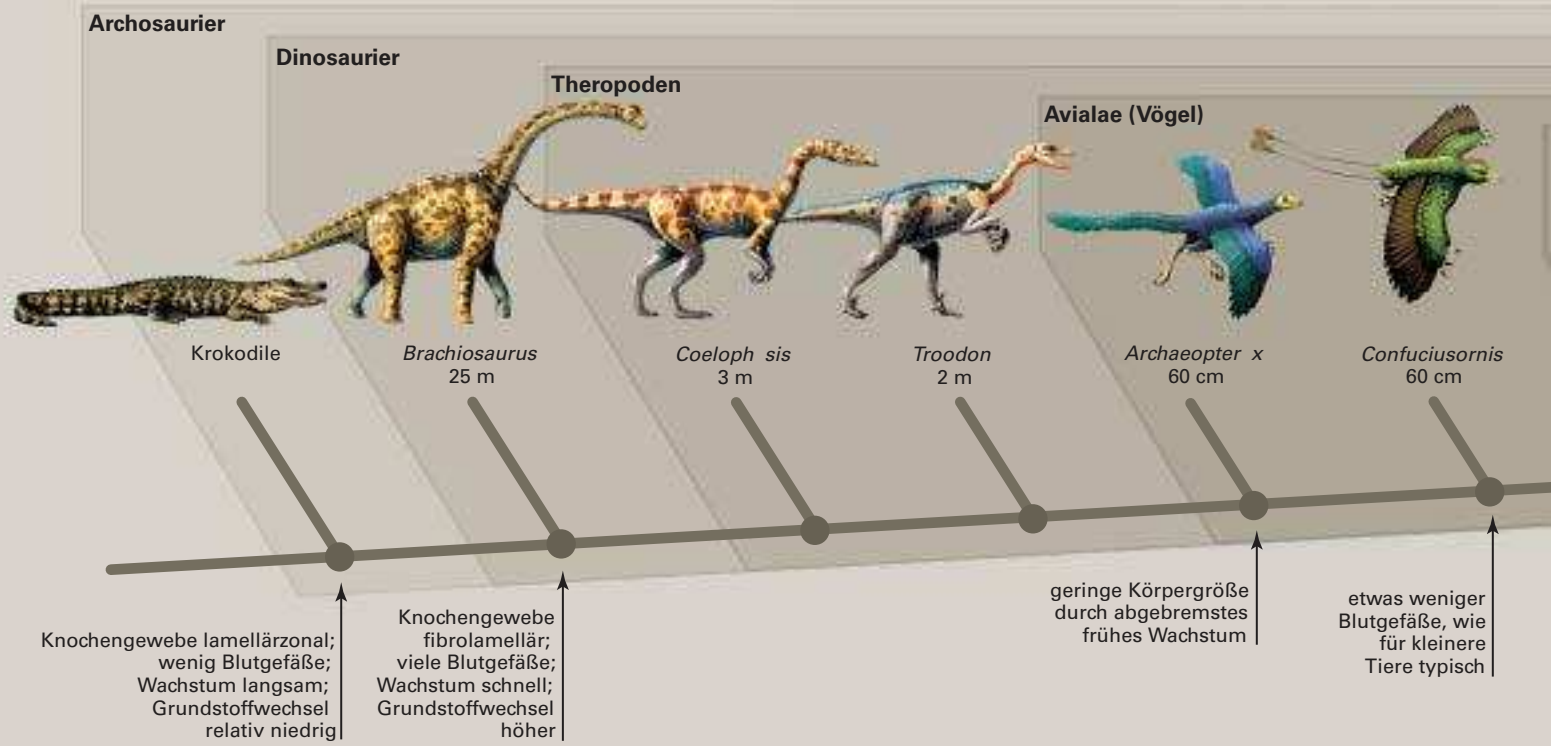




Die jährlichen Wachstumslinien sind mit Pfeilen markiert. Das Querschnittspräparat stammt vom Oberschenkelknochen eines *Troodon*, eines kleinen, Fleisch fressenden Dinosauriers. Außen werden die Abstände plötzlich schmal: Vielleicht ging das Wachstumstempo mit der Geschlechtsreife deutlich zurück.

ILLUSTRATIONEN: SHAWN GOULD; FOTO: J.R. HORNER, K. PADIAN UND A. DE RICQLÈS

Evolution des Wachstumstempos



Erst beschleunigt, dann verzögert, später wieder beschleunigt ... auf der Basis wiederholt veränderter Wachstumsgeschwindigkeiten und -phasen entwickelten sich die Dinosaurier und später aus ihnen die Vögel.

Reptilien wachsen langsam, dafür praktisch lebenslang. Die Dinosaurier wuchsen dagegen zunächst rapide, später so gut wie nicht mehr. Schon die ersten Vertreter besaßen anders gebildete Knochen als bei Kriechtieren sonst üblich. Manche der großen Arten waren mit um die zehn, andere mit spätestens 15 oder 20 Jahren fast ausgewachsen, trotz ihrer Riesengröße.

Wie konnten die Vögel, eigentlich eine moderne Gruppe von Dinosauriern, trotz dieser Urverwandtschaft so klein werden? Ein Vergleich der krähengroßen frühen Vogelform *Confuciusornis*, die vor 125 Millionen Jahren in China lebte, mit dem relativ klei-

▷ Was bedeutete es, wenn das Dinosaurierwachstum mehr dem von Elefanten glich als dem von Riesenkrokodilen? Antworten gibt der Aufbau des Knochengewebes – an mikroskopischen Dünnschliffen der langen Extremitätenknochen gut zu unterscheiden.

Beim Krokodil liegen die Wachstumslinien ziemlich eng beieinander (siehe Kasten S. 32, untere Bilder). Der Knochen ist sehr kompakt gebaut und hochgradig durchmineralisiert. Mit Kanälen für feine Blutgefäße ist er sparsam ausgestattet. Die Knochensubstanz bildet sich in einer Matrix aus ziemlich regelmäßig angeordneten Kollagenfasern. Diesen wenig durchbluteten Knochentyp nennen Histologen lamellärzonal.

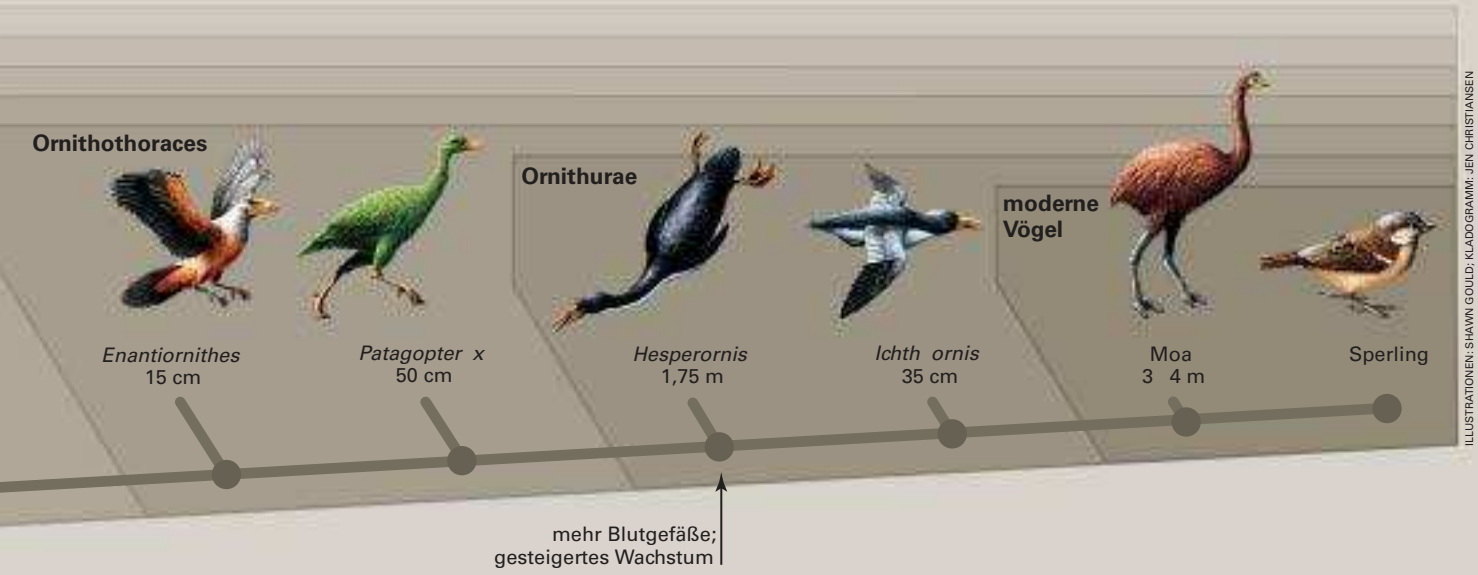
Ganz anders sieht ein typischer Röhrenknochen von Dinosauriern aus. Bei ihm liegen die Wachstumslinien zum größten Teil weit auseinander, und es gibt viele Kanälchen für die Blutversorgung. Diese wie locker gewebt wirkende Struktur erinnert in vielem an den für große Vögel und große Säugetiere charakteristischen fibrolamellären Typ (siehe Kasten S. 32, obere Bilder). Bei ihnen bildet sich Knochensubstanz in Phasen starken Knochenwachstums in einer Matrix aus einem scheinbar ungeordneten Gewirr von Kollagenfasern.

Wegbereitung für Vögel

In den 1940er Jahren erkannte Rodolfo Amprino von der Universität Turin, dass der Gewebetyp eines Knochens eng mit dem Wachstumstempo zusammenhängt. Ein fibrolamelläres Muster spricht demnach immer für schnelles Wachstum an der betreffenden Stelle, eine lamellärzonale Struktur für recht langsames. Beim selben Tier kann je nach Lebensstrategie und Situation beides vorkommen. Dabei gibt der sichtlich vorherrschende Typ offenbar einen guten Anhaltspunkt für die generelle Wachstumsweise. Die meisten Reptilien, auch Krokodile, wechseln sehr früh im Leben, lange vor der Reife, vom fibrolamellären zum lamellärzonalen Knochenbau. Dagegen lagerten die Dinosaurier so lange fibrolamelläre Schichten an, bis sie Erwachsenengröße erreicht hatten – unseres Erachtens ein deutliches Zeichen, dass sie in ihrer gesamten Jugend schnell wuchsen.

Zur gleichen Aussage kamen Erickson, Rogers und Scott A. Yerby von der Stanford-Universität (Kalifornien) auf einem anderen Weg. Sie berechneten für eine Reihe von Dinosaurierarten Wachstumskurven und die Entwicklungsgeschwindigkeit, indem sie das Alter einzelner Tiere anhand der Wachstumslinien in den Knochen ermittelten und dazu jeweils die Körpermasse abschätzten. Beim Vergleich mit anderen Wirbeltieren kam heraus, dass alle untersuchten Dinosaurier schneller groß wurden als jedes heutige Reptil. Viele von ihnen wuchsen etwa so geschwind wie moderne Beuteltiere. Die größten konnten sich im Verhältnis durchaus mit jetzigen sehr großen Säugetieren sowie mit schnell wachsenden Vögeln messen. Dieses Resultate vermochten wir zu bestätigen, als wir entsprechende Berechnungen mit der Körperlänge statt der -masse anstellten.

Überraschend war hieran weniger der Befund, dass die Wachstumsrate von Dinosauriern umso mehr beschleunigt war, je größer die Tiere wurden. Denn schon vor Längerem hatte Ted J. Case von der Universität von Kalifornien in Los Ange-



ILLUSTRATIONEN: SHAWN GOULD; KLADOGRAMM: JEN CHRISTIANSEN

nen, räuberischen Dinosaurier *Troodon* ergibt: *Troodon* wuchs in seinen Jugendjahren immer schnell. *Confuciusornis* dagegen verlangsamte das Tempo nach einem kurzen Spurt. Bei ihm sind nur die innersten Zonen der Knochen vom fibrolamellären Typ. Gerade in der Phase, in der die Dinosaurier besonders zulegten, hielt dieser frühe Vogel mit dem Wachstum ein.

Für das Fliegen mag das von Vorteil gewesen sein. Anscheinend trugen bereits die Vorfahren der Vögel Federn an den Vorderbeinen. Ein kleines Tier kann schneller mit den Flügeln schlagen als ein großes und die Traglast ist im Verhältnis geringer. Später in ihrer Evolution zogen die Vögel, einmal klein geworden, das Wachstumstempo kräftig an, jetzt aber auf eine sehr kurze, frühe Lebensphase beschränkt. Viele moderne Arten reifen binnen Wochen oder Monaten zur vollen Größe heran. Selbst der Strauß braucht dazu nur rund ein halbes Jahr. Die Vögel der späten Kreidezeit, so der flugunfähige *Patagopteryx*, der tauchende *Hesperornis* und der seeschwalbenähnliche *Ichthyornis*, wuchsen bereits schneller als ihre nahen Vorfahren, wenn auch immer noch langsamer als große Dinosaurier.

Seit wann die Vögel die Dinosaurier sogar übertrumpften, wissen wir bisher nicht genau. Irgendwann nach der Kreidezeit, im frühen Tertiär, dürfte das geschehen sein, vielleicht langsam, vielleicht aber auch plötzlich.

les gezeigt, dass in einer gegebenen Wirbeltierklasse die großen Arten ein stärkeres absolutes Wachstum aufweisen als die kleineren – auch wenn sie bis zur vollen Größe insgesamt länger brauchen. Diese Regel gilt für Fische ebenso wie für Amphibien, Reptilien, Vögel und Säugetiere. Das eigentlich Erstaunliche ist vielmehr, wie stark die Dinosaurier ihr Größenwachstum im Vergleich zu ihren Reptilienvorfahren gesteigert hatten. Das Tempo betrug ein Mehrfaches.

Wann in der Evolution mag die Wendung erfolgt sein? Um Evolutionslinien und Verwandtschaftsverhältnisse darzustellen, zeichneten die Forscher früher Stammbäume. Heute konstruieren sie so genannte Kladogramme, die den Abstammungsbeziehungen besser gerecht werden. Ein solches Kladogramm, gewonnen aus unzähligen anatomischen Merkmalen von Fossilien, existiert auch für die Ahnenreihe der Vögel (siehe Kasten oben). Diese stammen demnach von den Theropoden ab, räuberischen, zweibeinigen Dinosauriern, zu denen auch *Tyrannosaurus rex* gehört. Genau genommen bilden die Vögel hiernach einen Zweig der Reptilien. Viele Forscher stufen sie denn auch als gefiederte Dinosaurier ein (siehe »Der Ursprung der Vögel und ihres Fluges« von Kevin Padian und Luis M. Chiappe, Spektrum der Wissenschaft 4/1998, S. 38).

In das Reptilien-Vögel-Kladogramm setzten wir gemessene beziehungsweise geschätzte Wachstumsraten ein: für Eidechsen, für heutige und ausgestorbene Krokodile sowie für Dinosaurier einschließlich der Vögel. Außerdem fügten wir die Werte für Flugsaurier hinzu. Sie waren mit den Dinosauriern eng verwandt und zeigen ähnliche Knochenwachstumsmuster.

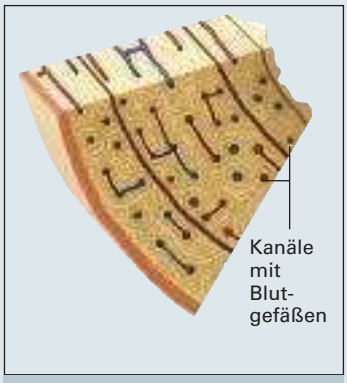
Fluoreszierende Küken

Um die Dinosaurierwerte zu ermitteln, konnten wir auch Befunde moderner Vögel verwerten, denn deren Knochen weisen das gleiche Spektrum an Geweben auf. Hilfreich war eine Studie von Jacques Castanet und seinen Kollegen von der Universität Paris VII an jungen Enten. Die Forscher injizierten den Küken wöchentlich eine andere fluoreszierende Farbe. So konnten sie später feststellen, wie dick die jeweils neu angelagerte Knochenschicht war (siehe Bild S. 28 unten).

Nach all dem war die Wuchsgeschwindigkeit von Dino- und Pterosauriern ausnahmslos deutlich höher als die von Reptilien anderer Gruppen, unbenommen einer erheblichen Spanne zwischen den einzelnen Arten. Und wir fanden auch für sie die Regel bestätigt, dass die kleineren Arten im Verhältnis langsamer wuchsen als die größeren.

Wie sah die Evolution dieser Wachstumsphänomene aus? Vor rund 230 Millionen Jahren, in der frühen Trias, spaltete sich ein Zweig der Reptilien in zwei Linien auf. Die eine brachte später unter anderem die Krokodile hervor, die andere die Dinosaurier und Flugsaurier – und die Vögel. Schon bald beschleunigten Angehörige dieser zweiten Linie ihr Wachstum in der Jugend. Ganz ungewöhnlich für Reptilien, legten sie in ihrem Leben zunächst Jahr um Jahr kräftig zu – viele so lange, bis sie praktisch ihre endgültige Größe erreicht hatten. Vielleicht war das auch ein Grund für den Erfolg der Dinosaurier: Denn gegen Ende der Trias, der ersten Phase des Erd- ▷

Knochen wie Warmblüter?

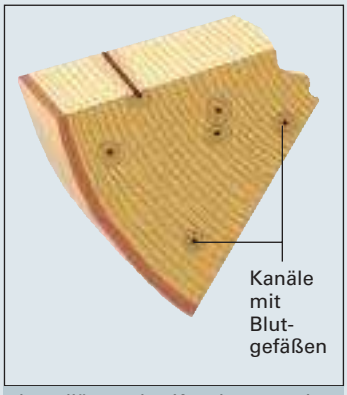


fibrolamelläres Knochengewebe

Wapiti

Strauß

Maiasaura



lamellärzonales Knochengewebe

Alligator

Die mikroskopische Struktur von Dinosaurierknochen gleicht eher der großer Vögel und Säugetiere (obere Bilder). Beim fibrolamellären Gewebetyp – einem dickschichtigen, lockeren Geflechtmuster – erlaubt die reiche Durchblutung ein rasches Wachstum (linkes oberes Foto). Viel langsamer wächst der – viel kompaktere, eng geschichtete, sparsam durchblutete – lamellärzonale Knochentyp der meisten anderen Reptilien (untere Bilder). Die Präparate von Wapiti (amerikanischer Rothirsch) und Alligator stammen von fast erwachsenen Tieren – zu erkennen daran, dass die äußeren Zonen weniger Versorgungskanäle enthalten: Das Wachstum war zuletzt schon stark verlangsamt. Die Knochen vom Strauß und dem Dinosaurier gehörten jungen Küken. Sie geben reichlich Blutgefäßen Raum. In dem Stadium besonders starken Wachstums hat sich der fibrolamelläre Typ noch nicht ausgebildet.

ILLUSTRATIONEN: SHAWN GOULD; FOTOS: J.R. HORNER, K. PADIAN UND A. DE RICQLÈS

▷ mittelalters, starben viele archaische Reptiliengruppen aus, deren Wachstum nach altem Muster verlief, die demnach wesentlich länger benötigten, um groß zu werden. Zu den Verlierern gehörten auch viele Krokodilverwandte.

Waren die Dinosaurier weniger abhängig von der Außentemperatur als andere Reptilien? Waren sie vielleicht sogar schon Warmblüter? Zumindest dürfte ihre gesteigerte Wachstumsgeschwindigkeit und die fortwährende Größenzunahme während der gesamten Jugendphase bedeutet haben, dass sie einen höheren Stoffwechsel besaßen als Kriechtiere üblicherweise, sodass sie mehr Energie unter anderem für neue Knochensubstanz bereitstellen konnten.

Denn nur bei einem relativ hohen Grundumsatz erscheint eine solch rasante, lang anhaltend rasche Größenzunahme überhaupt möglich. Obwohl ihr Wachstum wenig an das heutiger Reptilien erinnert, dafür in manchem recht stark an Muster von Vögeln und Säugetieren, wissen wir nicht, wie sie ihren Stoffwechsel regelten, ob sie ihre Körperwärme selbst aufrechterhielten und ob ihr Grundumsatz mehr dem heutiger Warmblüter glich als dem von Reptilien.

Manches spricht dafür, dass die Dinosaurier zumindest in einem sehr weiten Sinn warmblütig waren. Es dürfte allerdings schwierig sein, über die Einzelheiten Genaueres herauszufinden. Wie hoch war zum Beispiel ihre Körpertemperatur? In welchem Maße schwankte sie? Wie viel ihrer Wärme entnahmen die Kolosse ihrer Umgebung, und wie viel ging ihnen an die Umwelt verloren?

Vielleicht passten die Dinosaurier auch in dieser Hinsicht in keinen Rahmen, den die Wissenschaft bisher kennt. Sie scheinen zumindest in ihren Körperfunktionen keiner heutigen Tiergruppe wirklich zu gleichen – diesen Verdacht haben die Forscher inzwischen. Im Grunde müsste man einen Vogel entdecken, der fünf Tonnen wiegt, um sie zu verstehen. ◁

Armand de Ricqlès, John R. Horner und **Kevin Padian** (von links) forschen seit über zwölf Jahren zusammen über Dinosaurierknochen. Horner arbeitet an der Montana State University in Bozeman, Padian an der Universität von Kalifornien in Berkeley, de Ricqlès am Collège de France und an der Universität Paris VII.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Dinosaurs under the knife. Von E. Stokstad in: Science, Bd. 306, 5. Nov. 2004, S. 962

Age and growth dynamics of *Tyrannosaurus rex*. Von J. R. Horner und K. Padian in: Proceedings of the Royal Society of London, Biological Sciences, Bd. 271, Heft 1551, 22. Sept. 2004, S. 1875

Growth in small dinosaurs and pterosaurs: The evolution of archosaurian growth strategies. Von K. Padian et al. in: Journal of Vertebrate Palaeontology, Bd. 24, Heft. 3, Sept. 2004, S. 555

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Die Neurobiologie des Selbst

Wie entsteht das dauerhafte Erleben der eigenen Identität? Allmählich beginnen Hirnforscher zu verstehen, wodurch wir Menschen fähig werden, ganz selbstverständlich Ich zu sagen.

Von Carl Zimmer

Nichts erscheint uns offensichtlicher als das eigene Ich. »Sie schauen auf Ihren Körper hinunter und wissen, das ist Ihrer«, sagt Todd Heatherton, Psychologe an der Dartmouth University in Massachusetts. »Sie wissen, dass es Ihre Hand ist, mit der Sie gezielt nach etwas greifen. Wenn Sie in Erinnerungen schwelgen, dann sind es Ihre eigenen und nicht die einer anderen Person. Beim morgendlichen Aufwachen müssen Sie nicht erst lange überlegen, wer Sie sind.«

Das Selbst mag uns zwar einfach und durchsichtig vorkommen, dennoch bleibt es ein Rätsel. Heatherton selbst scheute sich jahrelang, es direkt zu erforschen, obwohl er sich seit jeher mit Selbstkontrolle, Selbstwertgefühl und ähnlichen Themen beschäftigt. »All meine Interessen kreisten um das Selbst, aber nicht um die philosophische Frage nach seinem Wesen«, erklärt er. »Ich mied solche Spekulationen – oder versuchte es wenigstens.«

Das hat sich geändert. Heute gehört Heatherton zu der wachsenden Zahl von Forschern, die dem Problem nicht länger ausweichen. Sie wollen herausfinden, wie das Selbst im Gehirn entsteht. In den letzten Jahren gelang es bereits, bestimmte Hirnaktivitäten zu identifizieren, die vermutlich für das Erzeugen verschiedener Aspekte von Ich-Bewusstsein wesentlich sind. Jetzt geht es um die Frage, wie diese Aktivitäten jedem von uns das durchgängige Gefühl vermitteln, eine einheitliche Person zu sein. Diese Forschung liefert auch Hinweise, wie sich das Selbst bei unseren hominiden Vorfahren entwickelt haben mag. Möglicherweise hilft sie sogar bei der Therapie der Alzheimer-Krankheit und anderer Störungen, die das Ich-Bewusstsein abbauen und gelegentlich völlig zerstören.

Das Ich – ein Sonderfall?

William James, der Begründer der amerikanischen Psychologie, wies 1890 in seinem bahnbrechenden Werk »The Principles of Psychology« der modernen Selbst-Erforschung den Weg: »Beginnen wir mit dem Selbst im weitesten Sinne und verfolgen es bis in seine feinste und subtilste Form hinein.« Obwohl das Selbst als Einheit erlebt werde, habe es viele Facetten – von der Wahrnehmung des eigenen Körpers über Erinnerungen an einen selbst bis zur Bewusstheit der eigenen sozialen Stellung. Zugleich räumte James ein, dass ihm ein Rätsel blieb, wie das Gehirn diese selbstbezogenen Gedanken erzeugt und zu einem einheitlichen Ich verknüpft.

Seither haben psychologische Experimente gewisse Hinweise geliefert. Zum Beispiel sollten Probanden sowohl Fragen über sich selbst als auch über andere Menschen beantworten. Später prüften die Forscher, wie gut sich die Versuchspersonen die Fragen gemerkt hatten. Die Probanden erinnerten sich stets besser an die Fragen über sich selbst als an diejenigen über andere. »Wenn wir Dinge innerlich als für das Selbst relevant kennzeichnen, merken wir sie uns besser«, resümiert Heatherton.

In den Augen mancher Psychologen bedeuten solche Ergebnisse nur, dass wir mit uns selbst besser vertraut sind als mit unseren Mitmenschen. Andere sehen da- ▷

▶ Jeder Mensch trägt ein Bild von sich selbst im Kopf herum. Neurowissenschaftler beginnen sich zu fragen, ob spezielle Areale im Gehirn für dieses Selbstbild zuständig sind – und wenn ja, ob Persönlichkeitsstörungen mit Schäden in diesen Arealen zusammenhängen.

AARON GOODMAN

▷ rin ein Indiz für die Sonderrolle des Selbst: Das Gehirn benutze zur Verarbeitung selbstbezogener Information ein eigenes, leistungsfähigeres System. Doch psychologische Tests reichten nicht aus, um die Frage zu entscheiden, denn in vielen Fällen machten die konkurrierenden Hypothesen die gleichen experimentellen Vorhersagen.

Bessere Anhaltspunkte ergaben sich aus Untersuchungen an Hirnverletzten. Der berühmteste Fall ist Phineas Gage, ein junger Vorarbeiter, der im 19. Jahrhundert beim Eisenbahnbau in Vermont beschäftigt war. Bei einer vorzeitigen Dynamitexplosion wurde eine schwere Eisenstange wie ein Geschoß durch die Luft geschleudert und durchschlug der Länge nach Gages Kopf. Erstaunlicherweise blieb Gage bei Bewusstsein und überlebte den Unfall.

Phineas Gage – nach Hinverletzung nicht mehr er sebst

Seinen Freunden fielen jedoch bald Persönlichkeitsveränderungen auf. Vor dem Unfall stand Gage im Ruf eines besonnenen, verantwortungsbewussten und umgänglichen Mannes. Danach wurde er jähzornig und rücksichtslos, traf Entscheidungen, die ihm selbst schadeten, und konnte seine Zukunft nicht mehr vernünftig planen. Nach Angaben seiner Freunde war er »nicht mehr Gage«.

Solche Fälle zeigen, dass das Selbst nicht gleichzusetzen ist mit Bewusstsein. Ein gestörtes Selbst muss nicht mit einer Bewusstseinstrübung einhergehen. Wie Hirnverletzungen zudem enthüllten, ist das Selbst auf komplizierte Weise zusammengesetzt. So berichtete 2002 eine Forschergruppe um Stan B. Klein an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara über einen als D. B. bezeichneten 75-jährigen Mann, der auf Grund eines Herzinfarkts einen Hirnschaden erlitten hatte und sich an nichts mehr zu erinnern vermochte, was er davor getan oder erlebt hatte. Klein prüfte D. B.s Selbstkenntnis anhand einer Liste von 60 Persönlichkeitseigenschaften. Der Patient sollte jeweils angeben, ob die Eigenschaften in geringem, mittlerem oder beträchtlichem Maße oder aber gar nicht auf ihn zutrafen. Dann sollte D. B.s Tochter mit Hilfe desselben Fragebogens ihren Vater beschreiben. Die Urteile von Vater und Tochter korrelierten signifikant miteinander. Irgendwie hatte D. B. ein Bewusstsein von sich selbst behalten, obwohl er keinerlei Zugriff mehr auf Erinnerungen an seine Person besaß.

Dank bildgebender Verfahren sind die Wissenschaftler heute nicht mehr auf die Beobachtung von Hirnverletzten angewiesen, sondern können dem gesunden Gehirn direkt bei der Arbeit zusehen. Eine Forschergruppe am University College London will damit klären, wie wir uns des eigenen Körpers bewusst werden. »Das ist der grundlegende, einfache Ausgangspunkt des Selbst«, betont die Psychologin Sarah-Jayne Blakemore.

Gibt das Gehirn den Befehl, einen Körperteil zu bewegen, sendet es zwei Signale. Das eine geht an diejenigen Hirnregionen, welche den betreffenden Körperteil steuern, das andere an die Areale, welche die Ausführung der Bewegung überwachen. »Ich vergleiche das gerne mit der Zweitadresse einer E-Mail«, erläutert Blakemore. »Genau dieselbe Information wird an einen anderen Ort geschickt.«

Mit Hilfe dieser Kopie sagt das Gehirn voraus, welche Art von Empfin-

AARON GOODMAN

Sobald C. – eine Frau mit gestörtem Körperbewusstsein – beobachtete, wie jemand berührt wurde, empfand sie selbst an der gleichen Stelle ihres eigenen Körpers deutlich eine Berührung. Sie konnte kaum glauben, dass nicht alle Menschen diese Erfahrung machen.

dung die Aktion erzeugen wird. Eine Augenbewegung wird bewirken, dass sich Objekte durch unser Gesichtsfeld verschieben. Sprechen wir, so werden wir unsere eigene Stimme vernehmen. Greifen wir nach der Türklinke, werden wir das kalte Metall spüren. Entspricht die tatsächliche Empfindung nicht ganz der Vorhersage, wird sich das Gehirn des Unterschieds bewusst. Die Abweichung veranlasst dann gesteigerte Aufmerksamkeit oder eine Korrektur der Handlung, damit das gewünschte Ergebnis erzielt wird.

Entspricht jedoch die Empfindung überhaupt nicht der Vorhersage, dann deutet das Gehirn die Aktion als fremdbestimmt. Blakemore und ihre Mitarbeiter wiesen dies an Hirnaufnahmen hypnotisierter Versuchspersonen nach. Die Forscher suggerierten ihnen, ein Flaschenzug ziehe ihren Arm in die Höhe, und die Testpersonen hoben den Arm. Doch ihr Gehirn verhielt sich, als hebe eine äußere Kraft und nicht sie selbst den Arm.

Eine ähnliche Störung des Ich-Erlebens könnte gewissen Symptomen der Schizophrenie zu Grunde liegen. Manche Patienten sind überzeugt, ihren eigenen Körper nicht steuern zu können. »Sie greifen mit einer völlig normalen Bewegung nach einem Glas«, erklärt Blakemore. »Doch dann sagen sie: ›Das war nicht ich. Diese Maschine dort drüben lenkt mich. Sie hat mich dazu gebracht, das zu tun.‹«

Untersuchungen an schizophrenen Patienten sprechen dafür, dass schlechte Vorhersagen der eigenen Handlungen die Ursache derartiger Wahnvorstellungen sind. Da die Empfindungen nicht zu den Vorhersagen passen, fühlt es sich an, als sei etwas anderes dafür verantwortlich. Auch akustische Halluzinationen könnten damit zu tun haben: Da die Kranken den Klang ihrer inneren Stimme nicht vorherzusagen vermögen, glauben sie, jemand anderer spreche.

Ein Grund für die Labilität des Ich-Gefühls könnte sein, dass der Mensch unausgesetzt versucht, sich in andere hineinzuversetzen. Nachgewiesenermaßen gibt es im Gehirn so genannte Spiegelneuronen, welche die Erfahrungen anderer Menschen nachvollziehen. Wird man beispielsweise Zeuge, wie jemand schmerzhafte Knüffe und Püffe erleidet, dann feuern Neuronen in der eigenen für Schmerzwahrnehmung zuständigen Hirnregion. Wie Blakemore und ihre Mitarbeiter feststellten, kann schon der bloße Anblick einer Berührung Spiegelneuronen aktivieren.

Kürzlich führten die Forscher einer Gruppe von Freiwilligen Videos vor, in denen Menschen links oder rechts im Gesicht oder am Hals berührt wurden. Die Filmsequenzen lösten dieselben Reaktionen in bestimmten Hirnarealen der Freiwilligen aus, die auftraten, wenn man sie selbst wirklich an den entsprechenden Körperstellen berührte. Auf die Idee zu dieser Studie kam Blakemore durch eine 41-jährige Frau, C., bei der diese Empathie extrem ausgeprägt war. Sobald C. sah, wie jemand angefasst wurde, hatte sie das Gefühl, sie werde an der gleichen Stelle des eigenen Körpers berührt. »Sie glaubte, das ginge jedem so«, berichtet Blakemore.

IN KÜRZE

- Immer mehr Neurobiologen erforschen, wie das Gehirn ein **stabiles Ich-Erleben** zu Stande bringt und aufrechterhält.
- Mehrere Hirnareale könnten zu einem **Selbst-Netzwerk** gehören. Diese Regionen reagieren besonders stark auf Informationen über das eigene Selbst. Wenn eine Person über ihre Eigenschaften nachdenkt, sind diese Regionen nachweislich aktiver als beim Nachdenken über andere Menschen.
- Ein Ziel solcher Selbst-Erforschungen ist, die Alzheimer-Krankheit besser zu verstehen und **neue Therapien für Demenzkranke** zu finden.

Ein spezielles Hirnareal für Selbstwahrnehmung?

Die Forscherin machte Aufnahmen vom Gehirn dieser Frau und verglich ihre Reaktionen mit denen normaler Freiwilliger. C.s berührungsempfindliche Areale sprachen stärker auf den Anblick einer Berührung an, als dies bei normalen Probanden der Fall war. Zudem wurde der vordere Teil der Insula – ein in der Seitenfurche der Großhirnrinde unter dem Schläfenlappen verborgenes Areal in der Nähe des Ohrs – bei C. aktiv, nicht jedoch bei den Vergleichsprobanden.

Blakemore hält es für bezeichnend, dass die Insula auch dann aktiv wird, wenn jemand Bilder des eigenen Gesichts gezeigt bekommt oder eigene Erinnerungen identifiziert. Möglicherweise hilft uns die vordere Insula, eine Information auf uns selbst zu beziehen statt auf andere Menschen. Im Fall von C. weist sie offenbar die Information einfach falsch zu.

Heatherton und seine Kollegen in Dartmouth untersuchen mit bildgebenden Verfahren die Frage, warum wir uns Informationen über uns selbst besser merken als Details über andere Personen. Die Forscher machten Hirnbilder von Testpersonen, die eine Folge von Adjektiven betrachteten. In manchen Fällen fragten die Wissenschaftler die Probanden, ob ein Wort auf sie selbst zutreffe. Ein anderes Mal fragten sie, ob ein Wort zu George W. Bush passe. Manchmal fragten sie einfach, ob das Wort in Großbuchstaben geschrieben war.

Dann verglichen die Forscher die Muster der Hirntätigkeit bei den verschiedenen Aufgaben. Wie sich zeigte, aktivierten Fragen nach dem Selbst gewisse Hirnareale, die bei Fragen nach anderen Personen inaktiv blieben. Die Ergebnisse stützen die Hypothese von der »Sonderrolle des Selbst«.

Nach Heathertons Befunden spielt eine Hirnregion eine besondere Rolle für das Selbst. Dieses Areal heißt medialer präfrontaler Cortex und liegt im Längsspalt zwischen den Hirnhälften unmittelbar hinter den Augen. Auch andere Laboratorien sind bei einschlägigen Studien auf dieses Areal aufmerksam geworden. Gegenwärtig versucht Heatherton herauszufinden, welchem Zweck es im Einzelnen dient.

»Die Vorstellung, irgendeine Stelle im Gehirn sei ›das Selbst‹, ist absurd«, sagt er. Vielmehr vermutet er, dass das Areal all die Wahrnehmungen und Erinnerungen, die zum Ich-Gefühl beitragen, zu einer stabilen Einheit verbindet. »Vielleicht führt es Informationen auf sinnvolle Weise zusammen«, meint Heatherton.

Falls er Recht hat, könnte der mediale präfrontale Cortex für das Selbst die gleiche Rolle spielen wie der Hippocampus für das Gedächtnis. Letzterer gehört zum limbischen System und ist unentbehrlich für die Bildung neuer Erinnerungen. Selbst nach einer Verletzung dieser Region bleiben alte Erinnerungen er- ▷

▷ halten. Doch vermutlich speichert der Hippocampus nicht selbst Informationen, sondern erzeugt Erinnerungen durch Verknüpfen weit auseinander liegender Hirnareale.

Ähnlich könnte der mediale präfrontale Cortex unentwegt damit beschäftigt sein, unser Selbst-Empfinden zusammenzuheften. Debra A. Gusnard von der Washington University untersucht, was im Gehirn vorgeht, wenn es ruht – das heißt, wenn es sich gerade nicht mit einer bestimmten Aufgabe beschäftigt. Und siehe da: Der mediale präfrontale Cortex zeigt dann mehr Aktivität als während vieler Denkvorgänge.

»Wir verbringen viel Zeit mit Tagträumen – wir sinnieren über ein Erlebnis oder überlegen, was wir von anderen halten sollen. All dies ist mit Selbstreflexion verbunden«, erklärt Heatherton.

Andere Wissenschaftler erforschen die neuronalen Netzwerke, die der mediale präfrontale Cortex möglicherweise organisiert. Matthew Lieberman von der Universität von Kalifornien in Los Angeles setzt bildgebende Verfahren ein, um das Rätsel D. B. zu lösen – den Fall jenes Mannes, der sich kannte, obwohl er sein Gedächtnis verloren hatte. Lieberman verglich die Hirntätigkeit von zwei Freiwilligengruppen: Fußballer und Laienschauspieler. Die Forscher erstellten zwei Wortlisten, die jeweils für eine der beiden Gruppen relevant waren: sportlich, kräftig, flink und so weiter für die Fußballer, für die Schauspieler Darsteller, dramatisch und so fort. Eine dritte Liste hatte zu keiner der beiden Gruppen einen besonderen Bezug – etwa schlampig und zuverlässig. Die Probanden sollten nun Wort für Wort entscheiden, ob es auf sie zutraf oder nicht.

Zwei Selbst-Netzwerke

Die Gehirne reagierten unterschiedlich. Fußballrelevante Wörter erhöhten bei Fußballern die Aktivität eines bestimmten Netzwerks, das auch bei Schauspielern aktiver wurde, wenn sie schauspielbezogene Wörter wahrnahmen. Wörter, die sich auf die jeweils andere Gruppe bezogen, aktivierten ein anderes Netzwerk stärker. Lieberman bezeichnet diese beiden Netzwerke als das »reflektive« und das »reflexive« System.

Das reflektive System zapft den Hippocampus und andere Hirnareale an, die Erinnerungen abrufen. Es umfasst auch Regionen, die Informationen im Bewusstsein halten. In neuartigen Situationen ist unser Ich-Bewusstsein darauf angewiesen, explizit über unsere Erlebnisse nachzudenken.

Bei weit fortgeschrittener Alzheimer-Erkrankung verliert der Patient jeden Bezug zu sich selbst. Vor allem die Hirnareale, die zum autobiografischen Gedächtnis beisteuern, werden irreparabel geschädigt.

Doch laut Lieberman übernimmt mit der Zeit das andere, reflexive System die Führung. Es verarbeitet nicht Erinnerungen, sondern Intuitionen, und zapft Areale an, die schnelle emotionale Reaktionen produzieren; diese beruhen nicht auf expliziten Überlegungen, sondern auf statistischen Assoziationen. Das reflexive System formt seine Selbstkenntnis langsam, denn es braucht viele Erfahrungen, um diese Assoziationen zu bilden. Doch sobald es Form annimmt, wird es sehr mächtig. Fußballspieler wissen, ob sie sportlich, kräftig oder flink sind, ohne sich eigens daran erinnern zu müssen. Solche Eigenschaften sind eng mit dem Selbstbild verwoben. Hingegen wissen sie nicht intuitiv, ob sie dramatisches Talent besitzen; in solchen Fällen müssen sie explizit über ihre Erfahrungen nachdenken.

Liebermans Ergebnisse lösen vielleicht das Rätsel um D. B.s paradoxe

Ist das Selbst etwas Besonderes?

J. W. Gazzaniga

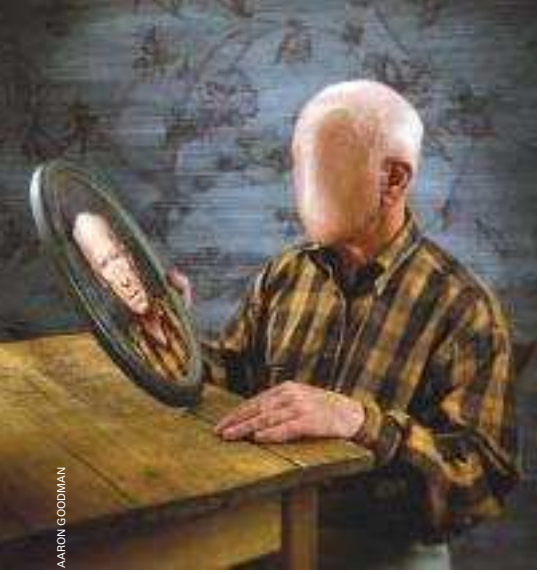
Die Fachleute sind noch geteilter Meinung darüber, ob das Gehirn das Selbst als Spezialfall behandelt: Verarbeitet es Informationen über das Selbst tatsächlich anders als Informationen über andere Lebensaspekte? Vielleicht werden manche Hirnareale, wenn wir an uns selbst denken, nur deshalb aktiver, weil unser Ich uns vertraut ist – und andere, ebenso vertraute Objekte würden dieselbe Reaktion auslösen.

Um diese Frage zu klären, fotografierten Forscher zunächst einen Split-Brain-Patienten, J. W., bei dem die Verbindung zwischen den Hirnhälften wegen einer nicht behandelbaren Epilepsie chirurgisch durchtrennt worden war. Außerdem fotografierten sie eine Person, die der Mann sehr gut kannte: Michael Gazzaniga, der bekannte Hirnforscher, hatte mit J. W. viel Zeit verbracht. Dann schufen die Tester im Computer eine Bildserie, in der das Gesicht von J. W. allmählich in Gazzanigas Gesicht überging (unten), und präsentierten die Bilder in zufälliger Reihenfolge. Bei jedem Bild sollte J. W. die Frage beantworten: »Bin das ich?« Dann wiederholten sie den Vorgang, diesmal mit der Frage: »Ist das Gazzaniga?« Den gleichen Test führten die Forscher auch mit anderen Gesichtern durch, die der Patient J. W. gut kannte.

Wie sich zeigte, war J. W.s rechte Hirnhälfte aktiver, wenn er vertraute Personen erkannte. Doch seine linke Hemisphäre zeigte die stärkste Aktivität, wenn er sich selbst auf den Fotos sah. Diese Ergebnisse stützen die Hypothese, dass das Selbst ein Spezialfall ist. Freilich ist mit diesem Versuch der Streit noch längst nicht eindeutig entschieden.

90 Prozent J. W. — allmählicher Übergang → 10 Prozent J. W.

AUS: DAVID J. TURK ET AL., MIKE OR ME? SELF RECOGNITION IN A SPLIT-BRAIN PATIENT, NATURE NEUROSCIENCE, SEPT. 2002, BD. 5, NR. 9



AARON GOODMAN

Selbstkenntnis. Möglicherweise hat seine Hirnläsion zwar das reflektive System zerstört, aber das reflexive System verschont.

Gegenwärtig erlebt die Neurowissenschaft des Selbst fast einen Boom, doch es gibt auch kritische Stimmen. »Ein Großteil dieser Studien ist so vage, dass daraus gar nichts folgt«, urteilt Martha Farah, Kognitionsforscherin an der University of Pennsylvania. Ihrer Ansicht nach sind die Experimente methodisch nicht sorgfältig genug konzipiert und lassen auch andere Erklärungen zu – beispielsweise, dass wir bestimmte Hirnregionen nutzen, um über Personen nachzudenken, uns selbst eingeschlossen. »Ich glaube nicht, dass es da irgendein ›Da‹ gibt«, meint sie.

Heatherton und andere Fachkollegen finden, Farah gehe mit einem jungen Forschungszweig zu hart ins Gericht. Doch sie räumen ein, dass sie über das Selbst-Netzwerk und seine Funktionsweise noch nicht genug wissen.

Kann ein Affe an sich denken?

Die Erforschung dieses Netzwerks könnte Hinweise darauf liefern, wie unser Selbst evolutionsgeschichtlich entstanden ist. Unsere Vorfahren unter den Primaten hatten wahrscheinlich das elementare Körperbewusstsein, das Blakemore und ihre Mitarbeiter erforschen. Affen sehen anscheinend ihre eigenen Handlungen voraus. Doch der Mensch hat ein Ich-Bewusstsein von einmaliger Komplexität entwickelt. Vielleicht ist es kein Zufall, dass just der mediale präfrontale Cortex laut Lieberman »ein typisch menschliches Hirnareal« ist.

Diese Region ist nicht nur größer als bei Primaten, sondern enthält auch eine höhere Konzentration einzigartiger Neuronen, so genannter Spindelzellen. Noch ist unklar, was diese Nervenzellen leisten; wahrscheinlich spielen sie eine wichtige Rolle bei der Informationsverarbeitung. »Anscheinend gibt es da etwas Besonderes«, meint Lieberman.

Wie Heatherton vermutet, hat sich das menschliche Selbst-Netzwerk unter dem Selektionsdruck entwickelt, den das komplexe Gemeinschaftsleben auf unsere Ahnen ausübte. Jahrmillionenlang lebten die Hominiden in kleinen Gruppen, gingen gemeinsam auf Nahrungssuche und teilten Beute und Sammelgut miteinander. »Das funktioniert nur mit Selbstkontrolle«, betont der Forscher. »Es verlangt Kooperation und gegenseitiges Vertrauen.« Und diese Verhaltensweisen, so Heatherton, erfordern ein differenziertes Ich-Bewusstsein.

Wenn das menschliche Selbst aus dem sozialen Leben der Hominiden hervorgegangen ist, erklärt das auch, warum wir so bereitwillig anderen Menschen die gleichen geistigen Zustände zuschreiben wie uns selbst. Dieses Übertragen beschränkt sich nicht auf die körperliche Einfühlung, die Blakemore untersucht. Der Mensch vermag außerdem viel geschickter als jedes Tier die Absichten und Gedanken seiner Artgenossen zu erraten – er verfügt über eine so genannte *theory of mind*.

Tatsächlich zeigt das Gehirn von Versuchspersonen, die sich gerade in jemand anderen hineinversetzen, gewisse Aktivitäten in dem Netzwerk, das zum Nachdenken über das Selbst gebraucht wird. Unter anderem wird der mediale präfrontale Cortex aktiv, wenn wir aus dem Verhalten anderer auf deren Innenleben schließen. »Sich selbst verstehen und eine *theory of mind* haben, das hängt eng zusammen«, erläutert Heatherton. »Man braucht beides, um ein richtiger Mensch zu sein.«

Es dauert seine Zeit, bis sich das Selbst voll entwickelt hat. Psychologen wissen seit Langem, dass Kinder nicht von Anfang an ein stabiles Bild von sich besitzen. »In ihrem Selbst-Begriff gibt es Konflikte, die sie überhaupt nicht stören«, bemerkt Lieberman. »Kleine Kinder sagen sich nicht dauernd: ›Ich bin noch immer dieselbe Person.‹ Anscheinend verbinden sie die kleinen Stücke des Selbst-Konzepts einfach nicht miteinander.«

Lieberman und seine Mitarbeiter möchten die Veränderungen des kindlichen Selbst-Begriffs mit bildgeben- ▷

WICHTIGE ONLINE-ADRESSEN

» **Aktiv sitzen – fit im Rücken**
der Hobbythek-Dynamikstuhl
direkt vom Erfinder, einem Physiker
www.schwipp.de

» **Buchliebhaber:**
Praktischer Helfer für Bücherfreunde
kostenloser Test unter:
www.buchliebaber.com
info@buchliebaber.com

» **Das Universum – unendliche Weiten ...**
Bücher, Lehrmaterial, DVDs, Puzzle, Globen
und mehr zum Thema Astronomie und Raumfahrt
www.spacebooks-etc.de

» **Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI**
Entwicklung, Konstruktion,
Technische Berechnung
Strömungsmechanik
www.etastern.de

» **DOK –**
Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

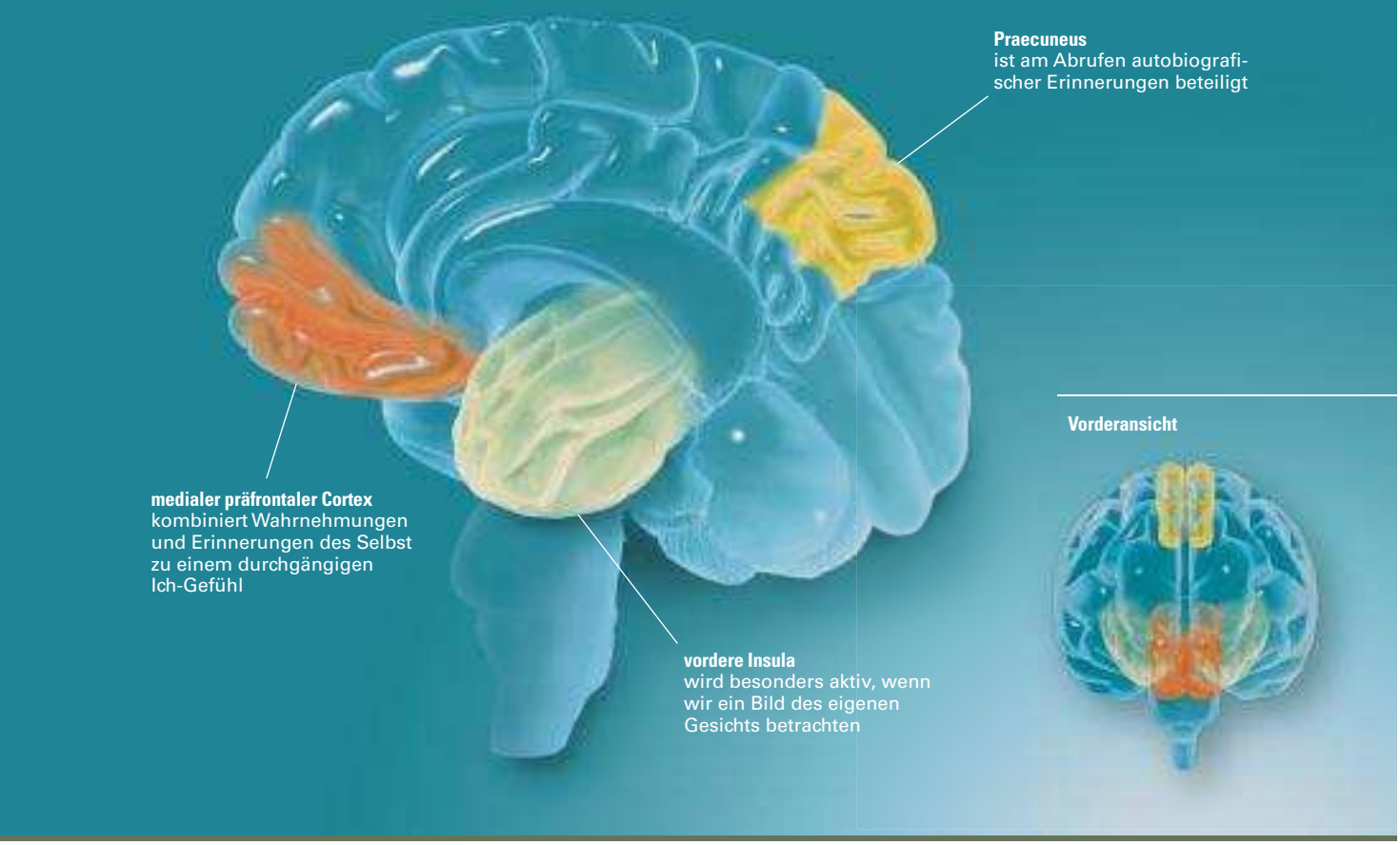
» **Kernmechanik –**
Optimiertes Modell:
Kernspin + Dipolmomente
www.kernmechanik.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon 0211 61 88-579
E-Mail: m.grigo@vhb.de

Komponenten eines Selbst-Netzwerks

Die in der Grafik hervorgehobenen Hirnareale sind – zumindest einigen Studien zufolge – an der Verarbeitung oder dem Abrufen von Informationen beteiligt, die in besonderer Weise mit dem Selbst zusammenhängen. Demnach sorgen diese Regionen im Gehirn für ein stabiles Selbst-Gefühl in unterschiedlichen Situationen. Der Einfachheit halber ist in der Schemazeichnung die linke Hemisphäre weggelassen – mit Ausnahme der vorderen Insula.



3FX, INC.

▷ den Verfahren verfolgen. Geplant ist, eine Gruppe von neunjährigen Kindern alle 18 Monate zu scannen, bis sie 15 Jahre alt sind. »Wir bitten sie, erst an sich selbst und dann an Harry Potter zu denken«, erläutert er. Das Forscherteam zeichnet bei beiden Aufgaben die Hirnaktivität auf und vergleicht die Resultate mit denen von Erwachsenen.

»Zehnjährige zeigen die gleiche Aktivierung des medialen präfrontalen Cortex wie Erwachsene«, berichtet Lieberman. Doch ein Areal, das bei Erwachsenen aktiv wird – der Praecuneus auf dem Scheitellappen –, bietet ein anderes Bild. »Wenn die Kinder an sich selbst denken, aktivieren sie diese Region weniger stark als bei Harry Potter.« Lieberman vermutet, dass bei Kindern das Selbst-Netzwerk noch nicht ganz in Betrieb ist. »Sie haben das Zeug dazu, wenden es aber noch nicht an wie Erwachsene.«

Ist das Selbst-Netzwerk jedoch erst einmal in Betrieb, leistet es Schwerstarbeit. »Sogar das visuelle System kann ausruhen – ich brauche nur die Augen zu schließen«, betont William Seeley, Neurologe an der Universität von Kalifornien in San Francisco. »Aber ich kann mich nie davon freimachen, dass ich in meinem Körper stecke oder dass ich dieselbe Person bin wie vor zehn Sekunden oder vor zehn Jahren. Dem kann ich nie entkommen, also muss dieses Netzwerk immer arbeiten.«

Ursachen für Alzheimer?

Je mehr Energie eine Zelle verbraucht, desto größer ist das Risiko, dass sie sich durch toxische Nebenprodukte schädigt. Wie Seeley vermutet, sind die schwer arbeitenden Neuronen des Selbst-Netzwerks davon besonders bedroht. Das mag gewisse Hirnerkrankungen erklären, die mit Persönlichkeitszerfall einhergehen. »Es ist schon merkwürdig, dass bei Tieren weder die Alzheimer-Krankheit noch andere Demenzen vorkommen«, meint der Forscher. Laut Seeley passen die neuen Hypothesen über das Selbst zu dem, was er und andere über Demenzkranke herausgefunden haben.

Bei Alzheimer-Patienten falten sich Proteine in den Neuronen falsch und bilden »Plaques«. Diese Eiweißablagerungen schädigen meist zuerst den Hippocampus und den Praecuneus – zwei Hirnregionen, die mit dem autobiografischen Gedächtnis zu tun haben. »Diese Areale ermöglichen uns, Bilder der eigenen Vergangenheit und Zukunft hervorzurufen und damit zu spielen«, erklärt Seeley. »Alzheimer-Patienten sind einfach weniger fähig, sich in der Zeit nach Belieben vorwärts und rückwärts zu bewegen.«

So furchtbar es für die Angehörigen sein mag, hilflos mit ansehen zu müssen, wie die Alzheimer-Krankheit einen geliebten Menschen Stück für Stück zerstört – andere Demenzen schädigen das Selbst sogar noch drastischer. Bei der Frontotemporaldemenz, auch Pick-Krankheit oder Pick-Atrophie genannt, degenerieren ganze Partien des Stirn- und des Schläfenlappens. In vielen Fällen wird der mediale präfrontale Cortex in Mitleidenschaft gezogen. Wenn die Krankheit das Selbst-Netzwerk zu vernichten beginnt, treten bei den Betroffenen seltsame Persönlichkeitsveränderungen auf.

Eine Patientin, von Seeley und anderen 2001 in der Zeitschrift »Neurology« beschrieben, hatte ihr Leben lang Schmuck und feines Kristallglas gesammelt, doch mit 62 Jahren begann sie plötzlich ausgestopfte Tiere zu kaufen. Vormals überzeugte Konservative, beschimpfte sie jetzt in Buchhandlungen die Käufer konservativer Bücher und verkündete: »Die Republikaner sollten von der Erde getilgt werden.«

Neuartige ethische Probleme

Andere Patienten bekehren sich mit einem Mal zu einer neuen Religion oder stürzen sich wie besessen auf Fotografieren oder Malerei. Dabei wissen sie kaum, warum sie nicht mehr so sind wie früher. »Sie äußern sich ziemlich banal, etwa: ›So bin ich jetzt eben‹«, berichtet Seeley. Die Pick-Krankheit kann binnen weniger Jahre zum Tod führen.

Für Michael Gazzaniga, Leiter des Zentrums für kognitive Neurowissenschaft in Dartmouth und Mitglied der Bioethik-Kommission des amerikanischen Präsidenten, sind mit der Entschlüsselung des Selbst neuartige ethische Probleme verbunden. »Ich glaube, wir kommen bald den Schaltkreisen des Selbst auf die Spur – selbstreferenzielles Gedächtnis, Selbstbeschreibung, Persönlichkeit, Ich-Bewusstsein«, spekuliert Gazzaniga. »Wir werden ungefähr wissen, was funktionieren muss, damit das Selbst aktiv werden kann.«

Er hält es sogar für möglich, dass sich künftig aus einer Aufnahme des Gehirns ablesen lässt, ob Alzheimer oder eine andere Demenz das Selbst eines Menschen zerstört hat. »Jemand wird fragen: Wie steht es um Großpapa?«, prophezeit er. »Und dann wird man eine Aufnahme von Großpapa unter bestimmten Bedingungen machen und sagen: Diese Schaltkreise arbeiten nicht.«

Gazzaniga fragt sich, ob die Menschen beim Verfassen einer Patientenverfügung bald auch den Verlust des Selbst einbeziehen werden. »Differenzierte Verfügungen werden ins Spiel kommen«, sagt er voraus. »Die Frage wird sein, ob man bei schwerer Demenz die medizinische Versorgung einstellt. Wenn der Patient sich eine Lungenentzündung zuzieht, gibt man ihm Antibiotika oder lässt man ihn sterben?«

Seeley ist mit Prognosen vorsichtiger: Hirnaufnahmen allein würden kaum die Entscheidung über Leben und Tod beeinflussen. Er sieht den eigentlichen Wert der Selbst-Erforschung in künftigen Therapien für Alzheimer- und andere Demenzen.

»Sobald wir wissen, welche Hirnareale an der Selbst-Repräsentation beteiligt sind, können wir noch genauer untersuchen, welche Zellen in diesem Areal wichtig sind. Dann können wir tiefer gehen und sagen, welche Moleküle in den Zellen und welche der sie steuernden Gene zu dieser Anfälligkeit führen«, sagt Seeley. »Und wenn wir das geschafft haben, sind wir den Krankheitsursachen und Therapien näher gekommen. Das ist der beste Grund für all diese Forschung. Es geht nicht bloß darum, mit Philosophen zu debattieren.« ◁

Carl Zimmer ist ein vielseitiger Wissenschaftsjournalist und lebt im US-Bundesstaat Connecticut. Sein Buch »Soul made flesh: The discovery of the brain – and how it changed the world« ist kürzlich als Taschenbuch erschienen. Auf Deutsch liegen von ihm zwei Bücher über biologische Themen vor: »Parasitus Rex« und »Die Quelle des Lebens«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Gehirn und Persönlichkeit: wie das Erleben eines stabilen Selbst hervorgebracht wird. Von Todd E. Feinberg. VAK-Verlag, Kirchzarten 2002

The lost self: Pathologies of the brain and identity. Von Todd E. Feinberg und Julian Paul Keenan (Hg.). Oxford University Press, 2005

Is self special? A critical review of evidence from experimental psychology and cognitive neuroscience. Von Seth J. Gillihan und Martha J. Farah in: Psychological Bulletin, Bd. 131, S. 76, 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

ANZEIGE

DON DIXON

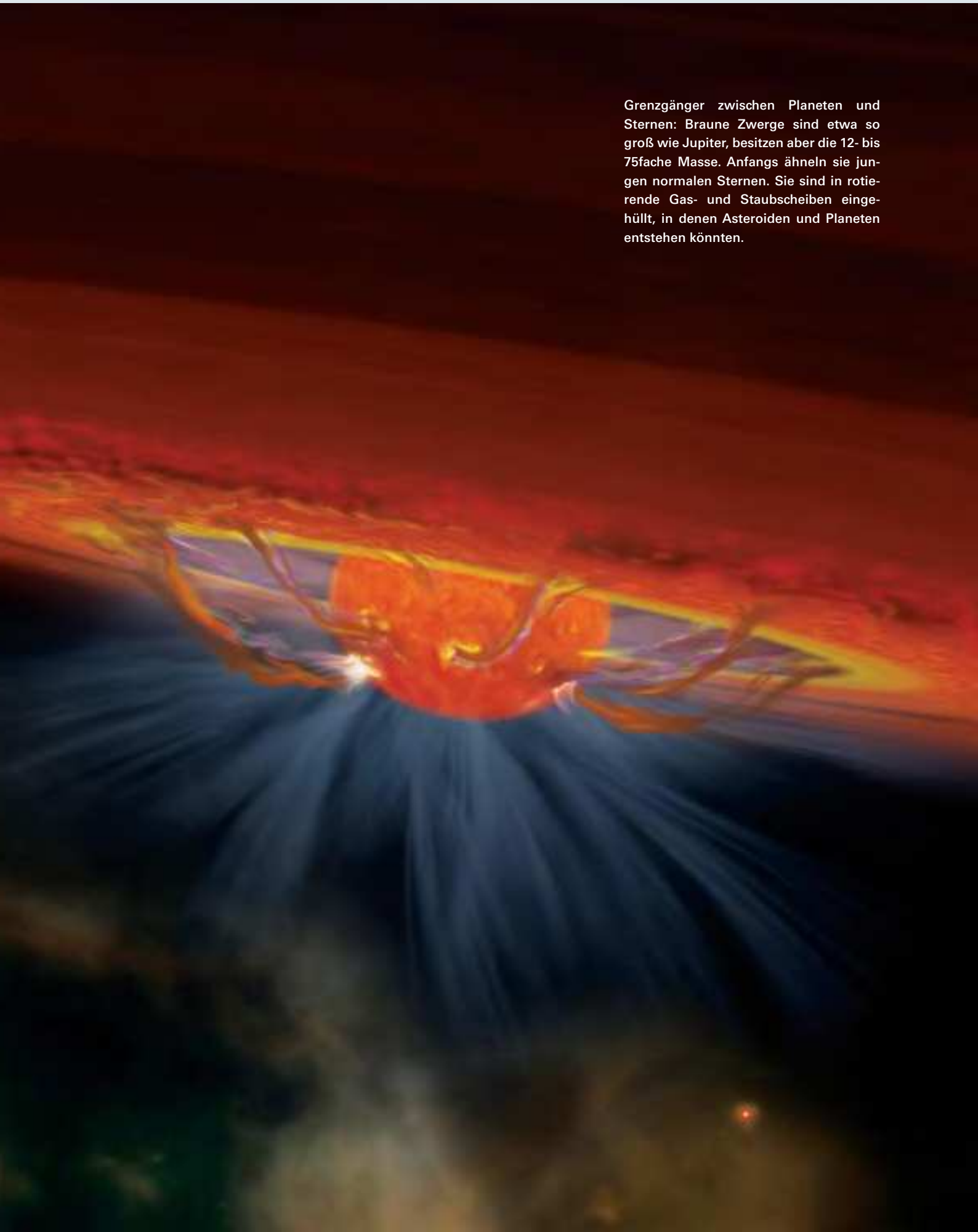
Der geheimnisvolle Ursprung der Braunen Zwerge

Um zu verstehen, wie sich diese eigenartigen Objekte bilden, müssen Astronomen ihre Vorstellung von der Entstehung der Planeten und Sterne überdenken.

Von Subhanjoy Mohanty
und Ray Jayawardhana

Was ist ein Planet? Diese Frage ist einfach, doch die Antwort darauf fällt den Astronomen derzeit immer schwerer. Einerseits verschwimmt die Grenze zwischen Planeten und kleineren Himmelskörpern zunehmend. Als Mike Brown und seine Kollegen vom California Institute of Technology in Pasadena kürzlich im äußeren Sonnensystem einen Himmelskörper entdeckten, der größer als Pluto ist, fachten sie die Debatte an, ob Pluto noch als Planet zählen soll. Und wenn ja, warum sollte man die größeren Asteroiden nicht ebenfalls als Planeten bezeichnen?

Andererseits herrscht auch am oberen Ende der Planetenskala ein Durcheinander, denn die Grenze zwischen Planeten und Sternen ist mittlerweile umstritten. Dabei schien dieser Unterschied ganz einfach zu sein: Ein Stern leuchtet selbst, während ein Planet das Licht des Sterns reflektiert, um den er kreist. Genauer gesagt besitzt ein Stern genug Masse, um in seinem Innern über einen längeren Zeitraum die Kernfusion zu ermöglichen. Damit erzeugt der Stern Energie und leuchtet. ▷



Grenzgänger zwischen Planeten und Sternen: Braune Zwerge sind etwa so groß wie Jupiter, besitzen aber die 12- bis 75fache Masse. Anfangs ähneln sie jungen normalen Sternen. Sie sind in rotierende Gas- und Staubscheiben eingehüllt, in denen Asteroiden und Planeten entstehen könnten.

▷ Sterne entstehen aus kollabierenden interstellaren Gaswolken. Im Gegensatz dazu sind Planeten zu massearm, um in ihrem Innern die Kernfusion zu unterhalten. Sie entstehen aus Materie, die bei der Entstehung des Sterns übrig blieb und eine rotierende Scheibe um ihn bildet.

Im vergangenen Jahrzehnt haben Astronomen viele Objekte entdeckt, die nicht in dieses einfache Schema passen. Die so genannten Braunen Zwerge weisen Eigenschaften beider Objektklassen auf, lassen sich aber keiner von ihnen eindeutig zuordnen.

Die Massen der Braunen Zwerge liegen zwischen dem 12- bis 75fachen derjenigen des Jupiters. Das sind 3 bis 18 Prozent der Sonnenmasse – zu wenig, um durch den Gasdruck in ihren Zentren eine Temperatur zu erreichen, die für das Zünden der Wasserstofffusion ausreicht. Bereits 8 Prozent der Sonnenmasse reichen jedoch aus, um die Fusion von Deuterium in Gang zu bringen, einem weniger häufigen Isotop von Wasserstoff. Neugeborene Braune Zwerge können daher wie schwache Sterne leuchten, doch sie verbrauchen ihren Deuteriumvorrat rasch und kühlen ab. Die Größe junger Brauner Zwerge ergibt sich wie bei Sternen aus dem Gleichgewicht zwischen dem nach innen gerichteten Druck der Schwerkraft und dem nach außen gerichteten thermischen Druck des Gases. Ältere Braune Zwerge ähneln eher den Planeten.

Bei ihnen stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der Schwerkraft und dem Druck ein, den die dicht gepackten Elektronen im Zentrum ausüben. Die Atmosphären junger Brauner Zwerge ähneln den Atmosphären von massearmen Sternen, während bei älteren meteorologische Phänomene wie Wolken und Niederschläge existieren sollten. So etwas kennen wir eher von Planeten.

Inzwischen haben Astronomen Hunderte dieser bemerkenswerten Objekte aufgespürt. Die meisten von ihnen bewegen sich wie Sterne allein durch die Galaxis – doch einige kreisen wie Planeten um Sterne. Möglicherweise gibt es im Milchstraßensystem genauso viele Braune Zwerge wie sonnenähnliche Sterne (siehe Spektrum der Wissenschaft, 7/2000, S. 28).

Kollabierende Fragmente

Wenn die Massen der Braunen Zwerge zwischen denen von Sternen und Planeten liegen: Auf welche Weise bilden sie sich, eher wie Planeten oder eher wie Sterne? Die meisten Planeten entstehen in Scheiben aus Gas und Staub um neugeborene Sterne. Große Gasplaneten bilden sich vermutlich aus staubhaltigen Trümmerstücken, die zu immer größeren Körpern anwachsen. Nachdem sie einige Erdmassen erreicht haben, nehmen sie immer schneller Gas aus ihrer Umgebung auf. Das zieht sich über einige Millionen Jahre hin, in denen sich die Scheibe allmählich auflöst. Ein Teil der Materie fällt auf den Zentralstern, der andere wird aus dem System herausgeblasen. Die zur Entstehung eines Riesenplaneten verfügbare Gasmenge verringert sich also im Lauf der Zeit und es scheint, dass nur Objekte mit höchstens der 10- bis 15fachen Jupitermasse entstehen können. Demzufolge müssen Braune Zwerge einen anderen Ursprung haben als Planeten. Beobachtungen bestätigen diese Schlussfolgerung: Die meisten Braunen Zwerge sind selbstständige Himmelskörper wie Sterne und nicht Objekte, die wie Planeten an einen Stern gebunden sind. Astronomen vermuten deshalb, dass Braune Zwerge eher wie Sterne entstehen.

Doch auch die übliche Vorstellung der Sternentstehung versagt bei den Braunen Zwergen. Sterne bilden sich aus gewaltigen Ansammlungen von kaltem Gas und Staub, den so genannten Molekülwolken. Jede dieser Wolken enthält genügend Material, um zahlreiche Sterne hervorzubringen. In ihrem Innern entwickeln sich »Kerne«. Das sind Regionen, die dichter als ihre Umgebung sind. Ist ein Kern ausreichend groß und dicht, so überwiegt die Schwerkraft den nach außen gerichteten Gasdruck. Übertrifft der Kern eine Mindestmasse, die unter anderem von der Temperatur des Gases abhängt, so kommt es zum Kollaps. Zu Ehren des englischen Astronomen James Jeans wird sie Jeans-Masse genannt. Beobachtungen zeigen, dass sie in Molekülwolken etwa eine Sonnenmasse beträgt.

Die meisten Kerne kollabieren nicht zu einem einzigen Stern. Vielmehr zerfällt ihre dichte Zentralregion in mehrere kleinere Verdichtungen. 1976 berechneten C. Low und Donald Lynden-Bell von der Universität Cambridge, dass die kleinsten dieser Fragmente Massen im Bereich einiger Jupitermassen haben könnten. Neuere Berechnungen, in denen Alan Boss von der Carnegie Institution in Washington auch den Einfluss von Magnetfeldern berücksichtigt hat, deuten darauf hin, dass sogar Fragmente von nur einer Jupitermasse möglich sind. Dabei handelt es sich um »Sternembryos«, auf welche Materie aus der Umgebung herabregnet. Nachdem diese Embryos praktisch die gesamte Materie des Kerns aufgenommen haben, entwickeln sie sich zu ausgewachsenen Sternen. Ein Kern mit einer Sonnenmasse zerfällt in höchstens zehn Embryos, aus denen eine Hand voll Sterne entstehen.

Wie aber kommt es dann zur Bildung der Braunen Zwerge, deren Masse ja nur wenige Hundertstel der Sonnenmasse beträgt? Irgendetwas muss verhindern, dass die Sternembryos zu richtigen Sternen heranwachsen. Die Frage, wie und warum ihr Wachstum aufhört, bevor sie als Sterne aufleuchten können, steht im Zentrum der Debatte.

Theoretiker haben mehrere Möglichkeiten zur Lösung dieses Problems vorgeschlagen. Bereits 2001 erkannten Bo ▷

IN KÜRZE

▶ Im letzten Jahrzehnt haben Astronomen **Hunderte von Braunen Zwergen** entdeckt. Als »Zwerg« bezeichnen sie einen kleinen Stern. Das Adjektiv »braun« weist darauf hin, dass man ihnen keine eindeutige Farbe zuordnen kann. In vieler Hinsicht stehen Braune Zwerge zwischen Planeten und Sternen.

▶ Wie Braune Zwerge entstehen, ist rätselhaft. Anfangs scheinen sie sich wie Sterne zu entwickeln, doch irgendetwas verhindert dann ihr weiteres Wachstum. Ein Szenario besagt, dass **die Turbulenz in einer Sternentstehungswolke** aus kaltem Gas als Wachstumsbremse wirkt. Ein anderes macht dafür die Schwerkraftwirkung naher Sternembryos verantwortlich.

▶ Ein Vergleich von Beobachtungen mit den Vorhersagen dieser Szenarien könnte die Antwort liefern. Sie hätte Folgen für unser Verständnis von der Entstehung der Sterne und Planeten. Und sie würde helfen zu klären, **was Sterne von Planeten unterscheidet**.

Himmlische Geburtswehen

STERN

Die Geburt eines Sterns beginnt mit dem Kollaps einer Region in einer interstellaren Gas- und Staubwolke. Der Sternembryo ist eine lokale Verdichtung innerhalb dieser Region.

Nach 100 000 Jahren:
Die Materie in der Umgebung des Sternembryos sammelt sich in einer Scheibe an.

Nach ein bis zehn Millionen Jahren:
Der Sternembryo nimmt an Masse zu und kontrahiert dabei. Die Scheibe dünnt aus, in ihr bilden sich Planeten.

Nach 30 Millionen Jahren:
Der Protostern ist so weit kontrahiert, dass in seinem Kern die Wasserstofffusion zündet: Ein neuer Stern ist geboren.

PLANET

Körner in der zirkumstellaren Scheibe klumpen zu immer größeren Körpern zusammen und werden schließlich zum Teil eines Planeten. Dessen Masse reicht nicht aus, um die Wasserstofffusion zu zünden. Er kühlt langsam ab und wird leuchtschwächer.

BRAUNER ZWERG

Zunächst folgt ein Brauner Zwerg dem normalen Pfad der Sternenstehung.

Nach 100 000 Jahren:
Aus irgendeinem Grund hört er auf zu wachsen.

Nach ein bis zehn Millionen Jahren:
Er erreicht jedoch eine Masse, die ausreicht, um die Fusion von Deuterium zu zünden.

Nach 100 Millionen Jahren:
Ist der Deuteriumvorrat verbraucht, beginnt der Braune Zwerg einem Planeten zu ähneln: Er kühlt ab und wird leuchtschwächer.

DON DIXON

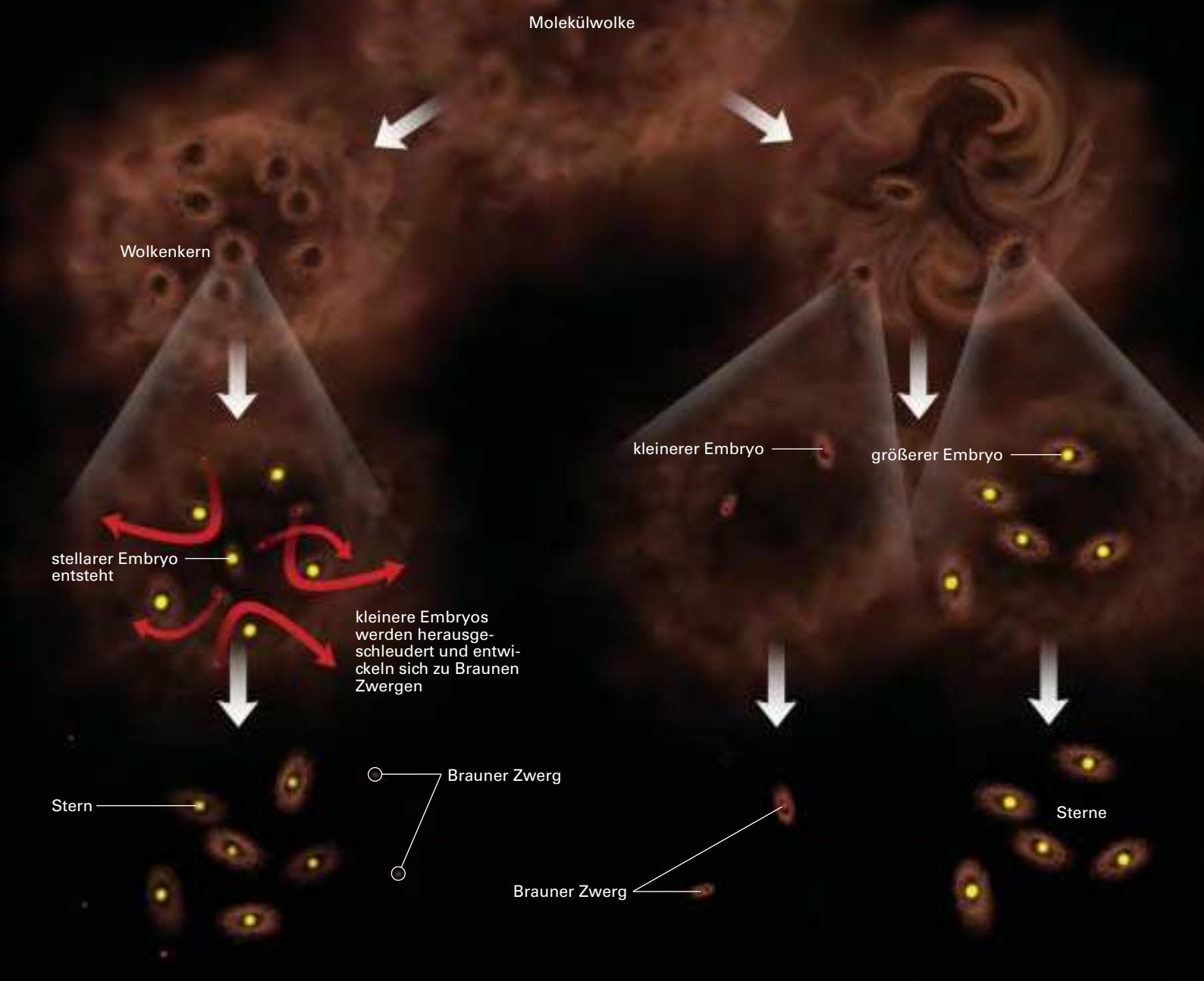
Unterbrochene Entwicklung

DON DIXON

Braune Zwerge entstehen wie Sterne aus stellaren Embryos in großen Wolken aus Gas und Staub. Doch irgendetwas verhindert, dass sie zu stellarer Größe heranwachsen. Astronomen diskutieren zwei konkurrierende Theorien:

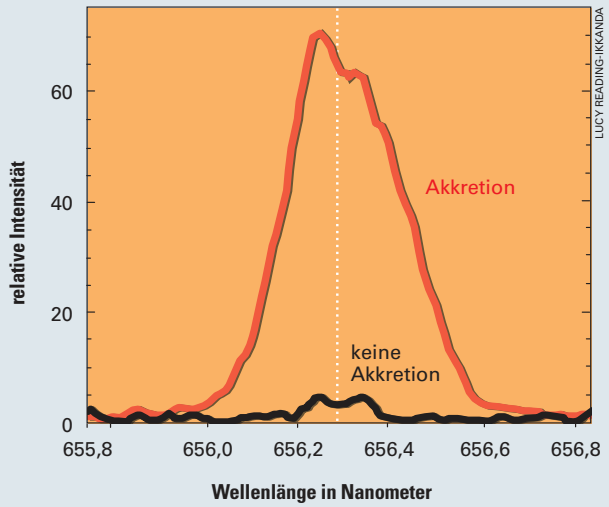
Ausstoßungs-Szenario
Vielleicht stören sich die Embryos gegenseitig und die massereicheren schleudern die masseärmeren aus der Gaswolke heraus.

Turbulenz-Szenario
Die Turbulenz des Gases sorgt dafür, dass die kollabierenden Bereiche einer Wolke unterschiedlich groß sind. Braune Zwerge bilden sich aus den kleineren Regionen.



Fingerabdruck einer stellaren Scheibe

Die Spektrallinie des Wasserstoffs verrät den Forschern, ob ein Brauner Zwerg eine Scheibe besitzt. Einzelne Wasserstoffatome senden Licht bei einer bestimmten Wellenlänge (gestrichelte Linie) aus. Wenn sich das Gas auf den Beobachter zu- oder von ihm wegbewegt, wird die Strahlung zu verschiedenen Wellenlängen hin verschoben (Doppler-Effekt). Das Profil spiegelt die Bewegungen innerhalb des Gases wider. An der Oberfläche des Zwergs bewegt es sich vergleichsweise langsam und verursacht eine schmale Linie im Spektrum (untere Kurve). Eine breitere Linie (obere Kurve) ist dagegen ein Hinweis auf Gas, das von einer Scheibe auf den Zwerg fällt. Die meisten jungen Braunen Zwerge besitzen Scheiben – sie scheinen wie gewöhnliche Sterne entstanden zu sein.



▷ Reipurth von der Universität von Hawaii in Hilo und Cathie Clarke von der Universität Cambridge (Großbritannien), dass Braune Zwerge das Opfer rivalisierender Geschwister sein könnten. In diesem Szenario konkurrieren die Embryos in einem Kern um die Aufnahme von Materie. Langsamer wachsende Embryos sind der Gnade ihrer schneller wachsenden, bald massereicheren Geschwister ausgeliefert: Deren Schwerkraft schleudert den kleineren Embryo aus dem Kern heraus, und dadurch ist er vom Gasvorrat abgeschnitten. Passiert dies, bevor der Embryo eine stellare Masse erreicht hat, so bleibt er ein Brauner Zwerg.

Ein Jahr später schlugen Paolo Padoan von der Universität von Kalifornien in San Diego und Ake Nordlund vom Astronomischen Observatorium Kopenhagen eine andere Möglichkeit vor. Sie bezweifeln, dass die Sternentstehung unbedingt mit einem Kern beginnt, der mindestens eine Sonnenmasse enthält. Obwohl sie für einen allein durch die Schwerkraft bewirkten Kollaps zu klein sind, können Kerne zusammenstürzen, wenn sie durch Turbulenzbewegungen in der Molekülwolke zusammengedrückt werden. Auf diese Weise könnten Braune Zwerge direkt aus Kernen geringer Masse entstehen. Die Verteilung der Turbulenzgeschwindigkeiten entscheidet darüber, wie viele große und kleine Kerne es gibt. Es ist kein zweiter Mechanismus – wie das Herauskatapultieren aus dem Kern – nötig, um das Wachstum der Embryonen zu stoppen. Braune Zwerge wären demzufolge nicht die Verlierer eines Wettkampfs um Ressourcen – vielmehr wären die Ressourcen gar nicht erst vorhanden gewesen.

Die beiden Szenarien führen zu verschiedenen Voraussagen über die Eigenschaften der Braunen Zwerge und deshalb sollte es mit Beobachtungen möglich sein, zwischen ihnen zu unterscheiden. Das Turbulenz-Szenario sagt voraus, dass alles, was für Sterne niedriger Masse gilt, auch auf Braune Zwerge zutrifft. Im Ausstoßungs-Szenario ähneln Braune Zwerge immer weniger den normalen Sternen, sobald sie aus der Wolke herausgeschleudert werden.

Zerrissene Paare

Junge Sterne sind von Scheiben aus Gas und Staub umgeben – Reste des Geburtsvorgangs. Im Verlauf von Jahrmillionen regnet dieses Material auf die Sterne herab – oder es bilden sich daraus Planeten, Monde, Asteroiden und Kometen. Trifft das Turbulenz-Szenario zu, dann sollten auch Braune Zwerge solche Scheiben besitzen, vielleicht sogar Planeten (siehe Kasten auf S. 50). Das Ausstoßungs-Szenario sagt das Gegenteil voraus: Wenn ein Embryo aus dem Kern herausgeschleudert wird, sollte er den Großteil der ihn umgebenden Scheibe verlieren. Das zeigen Simulationen von Matthew Bate von der Universität Exeter (Großbritannien) und seinen Kollegen.

Viele Sterne sind Mitglieder von Doppelsystemen und auch Braune Zwerge existieren als Paare. Dem Turbulenz-Szenario zufolge sollten Sternpaare und Zwergpaare gleich häufig sein. Der Vorgang des Herausschleuderns würde dagegen Doppelsysteme zerreißen, wenn die Bindung ihrer Partner zu schwach ist. Gut möglich, dass wir aus der Statistik dieser Paare Neues über den Entstehungsvorgang lernen können (siehe Kasten auf S. 48/49).

Astronomen suchen im Infrarotlicht nach den Scheiben. Die darin enthaltenen Staubkörner absorbieren Licht des Zentralsterns oder des Braunen Zwergs und strahlen diese Energie bei längeren Wellenlängen wieder ab. Dadurch sind Objekte mit Scheiben im Infraroten heller als diejenigen ohne Scheiben. Es ist sinnvoll, sich auf Braune Zwerge zu konzentrieren, die sich in Sternentstehungsregionen und Sternhaufen befinden, denn deren Alter lässt sich durch Beobachtungen recht genau bestimmen. Auf diese Weise ist es möglich, statistisch zu untersuchen, wie die Eigenschaften der Braunen Zwerge von ihrem Alter abhängen.

Inzwischen haben mehrere Arbeitsgruppen, darunter auch unser Team, zahlreiche junge Braune Zwerge auf einen solchen Infrarotexzess hin untersucht. Dabei zeigte sich, dass Scheiben bei Objekten mit einem Alter von wenigen Millionen Jahren allgegenwärtig sind. Bis zu 80 Prozent der jüngsten Objekte weisen Scheiben auf. Um junge Braune Zwerge sind sie genauso häufig wie um gleichaltrige Sterne.

Infrarotspektren geben uns nicht nur Hinweise auf die Existenz von Scheiben, sondern auch auf deren Form und physi- ▷

▷ kalischen Zustand. Manche Scheiben ähneln einer konkaven Linse, sind also zum Rand hin dicker als in der Mitte. Zu einer solchen Form kommt es, wenn Gas und Staub gut durchmischt sind. Andere Scheiben sind relativ flach, vermutlich weil die Staubkörner in ihnen so weit angewachsen sind, dass sie zu schwer sind, um vom Gas getragen zu werden. Der Staub konzentriert sich auf ihre Mittelebene. In Scheiben um Sterne finden Astronomen immer wieder Hinweise auf Silikate. Sie werten dies als Hinweise auf die Bildung von kleinen Staubkörnern auf der Oberfläche dieser Strukturen. Mit Hilfe großer Teleskope auf der Erde sowie dem Weltraumteleskop Spitzer konnten mehrere Arbeitsgruppen, darunter auch unsere, unlängst zeigen, dass auch die Scheiben von Braunen Zwergen viele dieser Eigenschaften zeigen.

Scheiben um Sterne und Braune Zwerge verraten sich auch durch die Materie, die auf den Stern herabfällt. Dieser als Akkretion bezeichnete Prozess ist im sichtbaren Bereich des Spektrums erkennbar. Spektrallinien des Wasserstoffs liefern Hinweise auf Gas, das den Magnetfeldlinien folgt und mit hoher Geschwindigkeit auf den Stern einströmt. Linien von ionisiertem Kalzium und von angeregtem Helium sind Anzeichen für die hohen Temperaturen, zu denen es beim Aufprall des Gases auf die Sternoberfläche kommt. Wieder andere Spektrallinien deuten auf Plasmaströme und Sternwinde hin, die nach außen gerichtet sind und entstehen, wenn die mit der Scheibe verwobenen Magnetfelder einen Teil der einströmenden Materie wieder herausschleudern. Die Spektren vieler neugeborener Brauner Zwerge zeigen diese Merkmale.

Der Materiezustrom beträgt etwa ein Zehntel oder ein Hundertstel der Akkretionsrate eines jungen Sterns mit einer Sonnenmasse. Er kann sich über mehrere Millionen Jahre hinziehen.

Zwar sprechen solche Beobachtungen für die Ähnlichkeit der Scheiben um Braune Zwerge mit denen um Sterne und deshalb für das Turbulenz-Szenario. Doch damit ist der Fall keineswegs abgeschlossen. Zwar sagt das Ausstoßungs-Szenario für Braune Zwerge ihren Verlust voraus – doch dieser Verlust muss nicht vollständig sein. Kleine Scheiben könnten das Herausschleudern überstehen. Existierende Beobachtungen verraten nur etwas über ihren Innenbereich, nicht aber über ihre Größe. Dass so viele Exemplare gefunden wurden, spricht demzufolge nicht grundsätzlich gegen das Ausstoßungs-Szenario.

Wachstum isolierter Kerne

Die Schwierigkeiten beim Interpretieren der Daten wecken den Wunsch, die Entstehung der Braunen Zwerge direkt zu beobachten. Tatsächlich haben Neil Evans von der Universität von Texas in Austin und seine Kollegen mit dem Weltraumteleskop Spitzer vor Kurzem Strahlungsquellen identifiziert, bei denen es sich offenbar um kleine, isolierte Kerne handelt, aus denen Objekten hervorgehen. Sollten weitere Beobachtungen bestätigen, dass dies Braune Zwerge sind, wäre das ein Hinweis für das Turbulenz-Szenario.

Die Häufigkeit von doppelten Braunen Zwergen ist ein zusätzlicher Prüfstein für ihre Entstehungsgeschichte. Bislang haben Astronomen nur wenige davon entdeckt. Sollten umfangreichere Durchmusterungen ergeben, dass Dop-

Zwergenpärchen im Computer

Mohanty und Jayawardhana stellen die Turbulenz in Molekülwolken dem Auswurf kleiner Sternembryos als sich widersprechende Entstehungsszenarien für Braune Zwerge gegenüber. Damit vereinfachen sie die aktuelle Diskussion in doppelter Weise. Einerseits könnten Sternembryos durch weitere Prozesse entstehen. Bereits 1997 vermutete Jeff Hester von der Staatsuniversität von Arizona in Tempe, dass die Gaswolke, aus der ein Sternembryo sein Material bezieht, durch die intensive Strahlung eines nahe gelegenen heißen Sterns verdampfen kann. Auch auf diese Weise wäre dem Embryo Material für das Wachstum entzogen.

Anthony Whitworth von der Universität Cardiff und Hans Zinnecker vom Astrophysikalischen Institut Potsdam zufolge ist dieser Vorgang zwar effizient, jedoch auf die Umgebung massereicher Sterne beschränkt. Er erklärt nicht, warum es selbst in Regionen ohne heiße, junge Sterne Braune Zwerge gibt. Denkbar ist auch, dass Braune Zwerge in den Scheiben massereicher Sterne entstehen, sobald diese mit anderen Scheiben zusammenstoßen. Auf Grund der hohen Dichte von Sternembryos in den Kernen von Molekülwolken muss es immer wieder zu solchen Begegnungen kommen.

Andererseits ist es sinnvoll, Turbulenz und Auswurf als Prozesse zu deuten, die gemeinsam wirken können, anstatt sie als voneinander unabhängige Szenarien zu behandeln. Tatsächlich sagt das im Text beschriebene Turbulenz-Modell nur eine Massenverteilung von kollabierenden Kernen voraus, verrät jedoch nichts über deren räumliche Anordnung. Sterne und Braune Zwerge können durchaus in kleinen Gruppen entstehen, die sich durch gegenseitige Wechselwirkungen in Einfach- und Doppelsysteme auflösen. Ebenso könnte es sein, dass die Fragmente weiterhin von ihrer näheren Umgebung Gas aufnehmen. Damit sind beide Voraussetzungen des Ausstoßungs-Szenarios gegeben.

Wie Mohanty und Jayawardhana schreiben, ist die Häufigkeit doppelter Brauner Zwerge ein wichtiger Prüfstein für ihre Entstehungsgeschichte. Dass beim gravitativen Zerfall einer jungen Sterngruppe auch Doppelsterne entstehen können, ist seit mehr als dreißig Jahren bekannt. Im Jahr 2003 gelang Michael Sterzik von der Europäischen Südsternwarte in Santiago (Chile) und Richard Durisen von der Indiana-Universität in Bloomington der Nachweis, dass Simulationen die beobachteten Eigenschaften von Doppelsternen und Paaren Brauner Zwerge gut wiedergeben können. Allerdings setzten sie voraus, dass die Braunen Zwerge aus Fragmenten der Molekülwolken gewachsen sind, die größer sind als die Abstände zwischen ihnen.

Können auch aus Fragmenten, die weiter voneinander entfernt sind, enge Paare Brauner Zwerge entstehen? Womöglich spielt hier die Gasaufnahme (Akkretion) und ihre Unterbrechung durch das Herausschleudern aus einem Kern der Molekülwolke eine wichtige Rolle. Dieser Frage bin ich zusammen mit Andreas Burkert von der Universitäts-Sternwarte München, Tho-

pelsysteme häufig sind, würde auch dies gegen die Ausstoßungs-Hypothese sprechen, da solche Systeme vermutlich beim Herausschleudern auseinander gerissen worden wären.

Was die Astronomen über die Entstehung von Braunen Zwergen lernen, wirkt sich auf unsere Theorien über die Entstehung von Sternen und Planeten aus. Sehnlich warten Astronomen auf eine Theorie, welche die so genannte Anfangsmassenfunktion der Sterne erklären kann, also die relative Häufigkeit von Sternen unterschiedlicher Masse. Diese ist nicht zuletzt für das Verständnis der Entstehung und Entwicklung der Galaxien von großer Bedeutung. Im Ausstoßungs-Szenario entscheiden die Wechselwirkungen zwischen den stellaren Embryos über die Häufigkeit verschiedener Sternmassen. Im Turbulenz-Szenario ist hingegen die Verteilung der Turbulenzgeschwindigkeiten in der Molekülwolke dafür verantwortlich.

Auf ähnliche Weise hängen auch Größe und Lebensdauer der stellaren Scheiben von dynamischen Wechselwirkungen in der Sternentstehungsregion ab. Das wirkt sich auf die Effizienz der Planetenentstehung aus. Sind solche Wechselwirkungen häufig, wie es das Ausstoßungs-Szenario voraussetzt, dann sollten Planetensysteme selten sein. Entscheidet aber die Turbulenz über die Masse der Sterne, dann sollten die Scheiben groß und langlebig sein. Planetensysteme um Braune Zwerge wären dann eher die Regel als die Ausnahme.

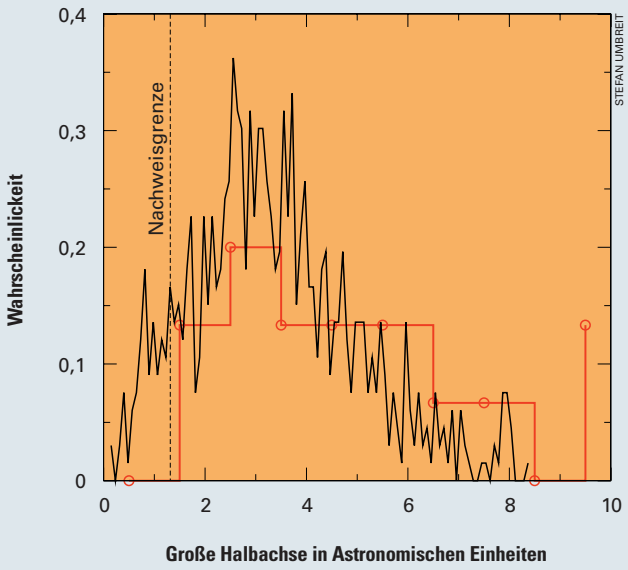
Es ist eine Ironie dieser Geschichte, dass die Definition der Braunen Zwerge ins Wanken gerät, sobald wir ihren Ursprung erforschen. Dass man die Grenze zwischen Braunen Zwergen und Planeten meist bei zwölf Jupitermassen ansetzt, ist willkürlich. Es gibt dafür keinen zwingenden theoretischen Grund. Im Ausstoßungs-Szenario können im Kern einer Molekülwolke selbst stellare Embryos mit nur einer Jupitermasse keimen. Werden sie schnell genug hinausgeschleudert, so entsteht ein Objekt mit ▷

mas Henning vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg (MPIA), Rainer Spurzem vom Astronomischen Rechen-Institut Heidelberg und Seppo Mikkola von der Universität Turku (Finnland) nachgegangen. Mit Computersimulationen untersuchten wir den Zerfall akkretierender Drei-Körper-Systeme. Zu Beginn der Simulation platzierten wir die Sternembryos in unterschiedlicher Konstellation im gegenseitigen Abstand von 200 Astronomischen Einheiten. Dabei entspricht eine Astronomische Einheit dem Abstand von der Erde zur Sonne (etwa 150 Millionen Kilometer). Durch Variation der Startparameter berechneten wir die statistischen Eigenschaften der herausgeschleuderten einfachen und doppelten Braunen Zwerge. In den Rechnungen führt die Akkretion dazu, dass die simulierten Braunen Zwerge Doppelsysteme mit typischen Abständen von nur drei bis vier Astronomischen Einheiten bilden.

Dieses Ergebnis verglichen wir mit einer neuen Studie von Paaren Brauner Zwerge, die Hervé Bouy vom Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik in Garching, Wolfgang Brandner vom MPIA sowie ihre Kollegen aus Hawaii, Lyon und Berkeley vor Kurzem veröffentlichten. Die Übereinstimmung ist erstaunlich gut (siehe Abbildungen rechts) und bestätigt uns darin, Auswurfprozesse als wesentliches Element in den Entwicklungsgeschichten dieser Objekte zu betrachten.

Stefan Umbreit

Seit seiner Promotion ist der Autor Stipendiat am Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie.



Häufigkeitsverteilung der beobachteten Großen Halbachsen der Bahnellipsen von Paaren Brauner Zwerge (rote Linie) sowie die Vorhersage der im Text beschriebenen Simulation. Die Astronomische Einheit ist der Abstand Erde-Sonne (etwa 150 Millionen Kilometer). Sehr enge Paare konnten bislang nicht aufgelöst werden.

Planeten um Braune Zwerge?

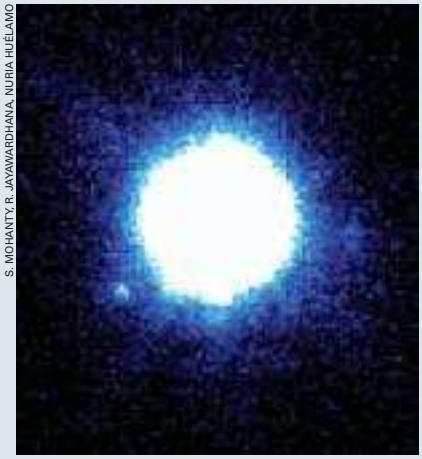
Die Entdeckung von Gas- und Staubscheiben um Braune Zwerge wirft eine faszinierende Frage auf: Gibt es Planeten um diese Objekte, die selbst kaum größer als ein Planet sind? Vermutlich schon. Gael Chauvin von der Europäischen Südsternwarte in Santiago (Chile) und seine Kollegen haben kürzlich einen Begleiter mit der fünffachen Jupitermasse entdeckt, der den jungen Braunen Zwerg mit der Kurzbezeichnung 2M1207A im Sternbild Wasserschlange in einem Abstand von rund 40 Astronomischen Einheiten umkreist. Das ist etwa die Entfernung Pluto-Sonne. Weitere Beobachtungen ergaben, dass dieser Begleiter sogar eine Scheibe besitzt, die womöglich Rohmaterial für Monde enthält.

Bis vor Kurzem haben Planetenjäger massearme Sterne und Braune Zwerge bei ihrer Suche weit gehend ignoriert. Zum Teil lag das an einer geozentrische Sichtweise: Um ein Sonnensys-tem wie das unsere zu finden, müsste man eben bei sonnenähnlichen Sternen suchen, dachten die Astronomen. Hinzu kommt, dass massearme Sterne leuchtschwächer und deshalb schwieriger mit einer Genauigkeit zu beobachten sind, die für die Entdeckung von Planeten nötig ist. Von den mehr als 170 bisher entdeckten Riesenplaneten kreisen nur wenige um Sterne mit geringerer Masse als die Sonne – und selbst diese Sterne sind noch viel massereicher als die massereichsten Braunen Zwerge.

Die Astronomen zerbrechen sich nun ihre Köpfe darüber, wie der von Chauvin und seinen Kollegen gefundene Begleiter entstanden sein kann. Die bislang entdeckten Scheiben von Braunen Zwergen enthalten nur wenige Jupitermassen an Gas und Staub. Gregory Laughlin und Peter Bodenheimer von der Universität von Kalifornien in Santa Cruz sowie Fred Adams von der Universität von Michigan in Ann Arbor vermuten, dass sich eine derart magere Scheibe auflösen würde, bevor ein Körper Planetengröße erreichen könnte. Demnach hätte sich der von Chauvin und seinen Mitarbeitern entdeckte Begleiter gar nicht in der Scheibe gebildet. Wahrscheinlicher wäre, dass er genauso wie der Zwerg entstanden ist – also aus einer kontrahierenden Gaswolke. Das Paar wäre ein Miniaturdoppelstern.

Diese Einschränkung gilt allerdings nur für Riesenplaneten. Es gibt keinen Grund, warum nicht Asteroiden, Kometen oder erdgroße Planeten in der Scheibe eines Braunen Zwergs entstehen sollten. Dániel Apai vom Steward-Observatorium in Tucson (Arizona) und Kollegen vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg sind sogar davon überzeugt, in Infrarotspektren von Spitzer Anzeichen für das Wachstum der Staubkörner zu sehen – ein Hinweis auf frühe Stadien der Planetenbildung um Braune Zwerge.

Eine andere Möglichkeit ist, nach den Löchern zu suchen, die Planeten in einer Scheibe verursachen. Astronomen können auch das Licht des Braunen Zwergs überwachen: Wenn es sich periodisch abschwächt, könnte dies auf einen Planeten deuten, der auf seiner Bahn vor dem Zwerg vorüberzieht und diesen verdeckt.



S. MOHANTY, R. JAYAWARDHANA, NURIA HUÉLAMO

Der Braune Zwerg 2M1207A mit seinem planetaren Begleiter (links unten), im Infrarotlicht aufgenommen mit dem Keck-Teleskop auf dem Mauna Kea (Hawaii)

▷ der Masse eines Planeten. Und auch im Turbulenz-Szenario kann die chaotische Bewegung des Gases den Kollaps von Objekten auslösen, die viel kleiner sind, als die gewöhnliche Definition von Braunen Zwergen besagt. Neuere Beobachtungen deuten tatsächlich auf die Existenz von isolierten Braunen Zwergen mit nur wenigen Jupitermassen hin. Bestätigt sich dies, dann wären die Astronomen gezwungen, ihre Planetendefinition erneut zu überdenken.

Intuitiv scheinen wir beim Studium der Natur Grenzen zu bevorzugen, die es uns erlauben, unterschiedliche Dinge eindeutig voneinander zu unterscheiden. Stattdessen stehen wir jedoch einem Kontinuum von Objekten gegenüber, deren Eigenschaften sich überlappen. Das Studium der Braunen Zwerge zeigt, dass wir in einer solchen Übergangszone einzigartige Erkenntnisse darüber gewinnen können, was Sterne und Planeten wirklich ausmacht. ◁

Subhanjoy Mohanty (oben) und **Ray Jayawardhana** untersuchen mit Großteleskopen massearme Sterne und Braune Zwerge. Mohanty ist als Postdoc am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics tätig. Jayawardhana ist Professor für Astronomie und Astrophysik an der Universität Toronto. Er ist außerdem ein erfolgreicher Wissenschaftsautor und Redakteur des Magazins »Astronomy«. Im Jahr 2003 wurde er vom American Institute of Physics mit dem »Science Writing Award for a Scientist« ausgezeichnet.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Braune Zwerge: Entstehung, Scheiben, Doppelsysteme und Atmosphären. Von Coryn Bailer-Jones, Wolfgang Brandner und Thomas Henning in: Sterne und Weltraum, 4/2006, S. 34

The decay of accreting triple systems as brown dwarf formation scenario. Von Stefan Umbreit et al. in: Astrophysical Journal, Bd. 623, S. 940, 2005

The »mysterious« origin of brown dwarfs. Von Paolo Padoan und Ake Nordlund in: Astrophysical Journal, Bd. 617, S. 559, 2004

The formation of brown dwarfs as ejected stellar embryos. Von Bo Reipurth und Cathie J. Clarke in: Astronomical Journal, Bd. 122, S. 432, 2001

Star factories: the birth of stars and planets. Von Ray Jayawardhana. Streck Vaughn (Harcourt), 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

FUSSBALL

Anpfiff für »Teamgeist«

Eine neue Generation von Fußbällen sorgt bei der Weltmeisterschaft für Chancengleichheit.

Von Bernhard Gerl

Wenn »König Fußball« bald über Medien und Stammtische herrscht, wird einer vermutlich kaum Beachtung finden: der Ball selbst. Doch angenommen, beim Finale regnet es. »Das Leder« hat bereits zwei anstrengende Halbzeiten hinter sich, es geht in die Verlängerung. Könnte der – natürlich deutsche – Stürmer vor der schwierigen Aufgabe stehen, einen feuchten und nicht mehr voll elastischen Ball ins gegnerische Tor befördern zu müssen? Zum Glück nicht.

Helmut Rahn kickte noch einen Ball aus handvernähten Lederstreifen, als er 1954 das »Wunder von Bern« vollbrachte und Deutschland Weltmeister wurde. Ein solcher Ball war nicht gleichmäßig rund, das Leder konnte sich mit Wasser voll saugen und es machte durchaus einen Unterschied, ob der Fuß auf eine Lederfläche oder eine steife Naht traf. Die ideale Kugelform rückte aber dann 1970 in Reichweite: Zur WM in Mexiko wurden erstmals zwölf schwarze Fünfecke und 20 weiße Sechsecke miteinander vernäht. Das Muster hatte einen großen Vorteil: Der neue Ball war im Schwarz-Weiß-Fernsehen besser zu erkennen.

In den nächsten Jahren ergänzten und ersetzten wasserdichte Kunststoffe das Leder. Seit der Weltmeisterschaft 1998 in Frankreich macht überdies eine Schicht aus »syntaktischem Schaum« den Ball noch strapazierfähiger und formbeständiger. Diese dichte Lage aus gasgefüllten, geschlossenen Poren wandelt die Wucht, die der Ball beim Kicken aufnimmt, besser in kinetische Energie um, macht ihn mithin schneller.

Für die Weltmeisterschaft in Deutschland hat sich der Hersteller Adidas eine weitere Optimierung einfallen lassen. Der Fußball mit dem schönen Namen »Teamgeist« besteht nicht mehr aus ebenen, sondern aus 14 unterschiedlich geformten Flicken, so genannten Panels. Damit entspricht das Spielgerät noch besser der Kugelform und damit den neuen Regeln des Deutschen Fußballbunds. Weitere Vorteile dieses Designs: Während bei herkömmlichen Bällen an 60 Punkten drei Elemente aufeinander stoßen, sind es beim »Teamgeist« nur noch 24; die Gesamtlänge der Stoßkanten verringerte sich von 405 um mehr als 15 Prozent auf knapp 340 Zentimeter. Zudem wird dieser Ball erstmals nicht mehr genäht, sondern geklebt. Alle diese Faktoren zusammen sorgen für konstante mechanische Eigenschaften über das ganze Rund. Deshalb verhält sich der Ball bei jedem Schuss absolut identisch, ganz egal, wie er gerade liegt und wo er getroffen wird.

Damit wird »Teamgeist« auch den strengen Anforderungen der Fifa (Fédération Internationale de Football Association) gerecht. Die verlangt als Rundheitskriterium, dass der Durchmesser an 16 Punkten nicht mehr als 1,5 Prozent vom Durchschnittswert abweicht. Außerdem darf der Ball während des Spiels nicht mehr als zehn Prozent seines Eigengewichts an Wasser aufnehmen. Die etwa 2000 Tritte während eines Spiels sollten ihn unbeeindruckt lassen, was an Probeexemplaren einer Serie getestet wird, die man je 2500-mal mit 50 Kilometern pro Stunde gegen eine Stahlplatte schießt. Wie elastisch sich der Ball verhält, erweist sich, wenn er zehnmal aus zwei Meter Höhe auf eine Stahlplatte fällt. Die Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten Rückprall darf höchstens zehn Zentimeter betragen. Gehen zudem nicht mehr als zehn Prozent des Luftdrucks von 0,6 bis 1,1 Atmosphären in drei Tagen verloren, sind die wichtigsten Fifa-Normen erfüllt. Der neue WM-Ball genügt all diesen Kriterien ohne Einschränkungen und deshalb können sich die Zuschauer sicher sein, dass bei jedem Spiel »Teamgeist« auf dem Rasen herrscht. ◁

Bernhard Gerl arbeitet als freier Fachjournalist in Mainz.

Um zu testen, ob sich der Ball während des Spiels immer gleich verhält, wurde ein Roboterbein entwickelt, das einen identischen Schuss mit stets gleichem Winkel, konstanter Schusskraft und -geschwindigkeit immer wieder ausführt. Eine Hochgeschwindigkeitskamera analysiert den Aufprall.

Die Außenhaut der Panels besteht aus einer eigens entwickelten Polyurethanmischung, die den idealen Mix aus Abriebfestigkeit, Weichheit und Wasserfestigkeit bietet. Darunter befindet sich Kunststoffschaum, dessen millimetergroße, gasgefüllte Poren auch bei den starken Belastungen während des Spiels nicht platzen. Der Unterbau, Karkasse genannt, besteht aus besonders strapazierfähigem Polyester und Baumwolle. Er wird durch Neoprenschaum mit den Panels verklebt. Eine Latexblase hält die Luft. Muster und Schriftzüge werden von hinten auf eine transparente Folie gedruckt. Diese wird schließlich als Außenschicht auf den Ball geklebt, damit bei Feuchtigkeit kein Schmierfilm entsteht.

WUSSTEN SIE SCHON?

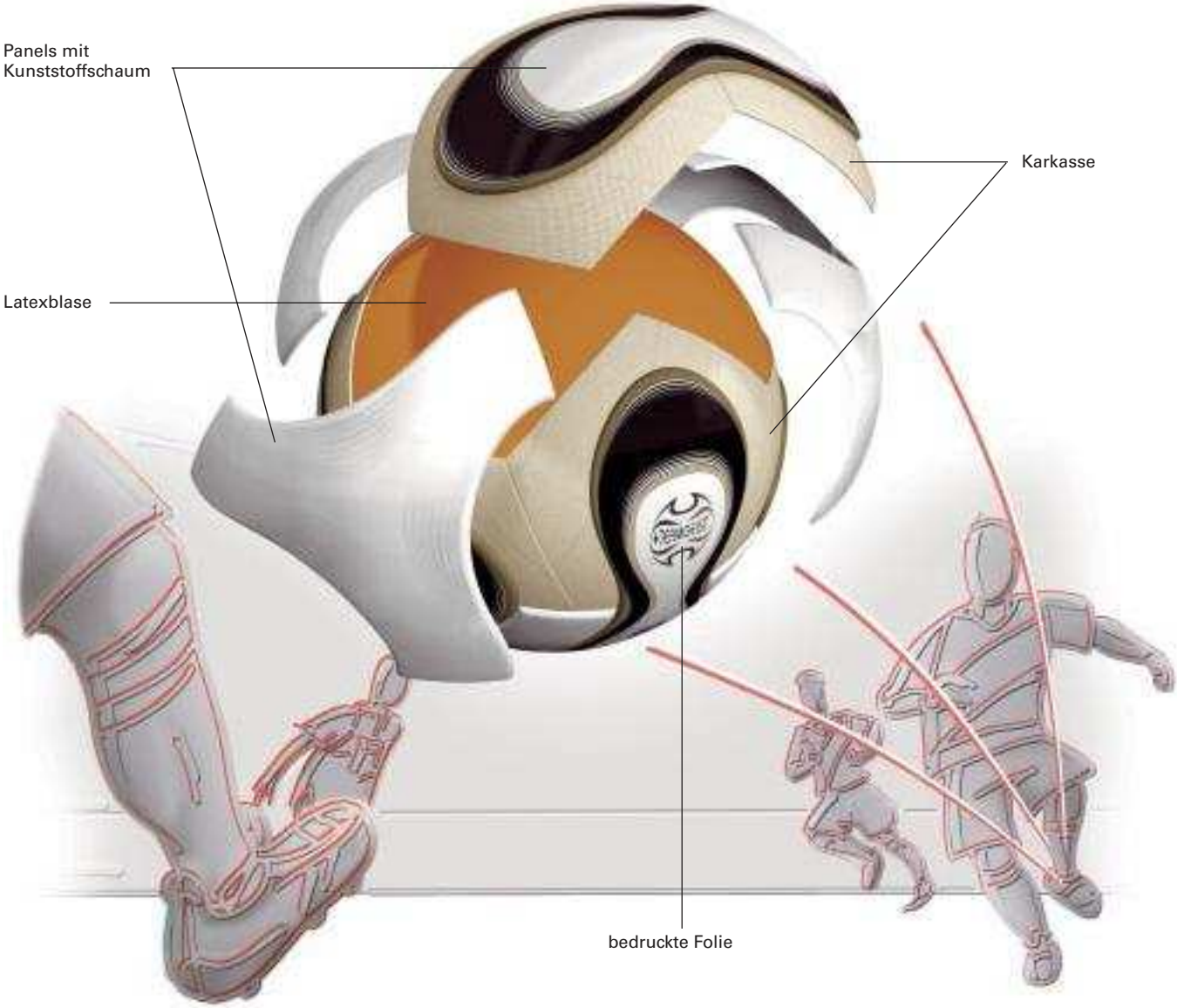
▶ **Die gekrümmte Flugbahn einer »Bananenflanke«** macht sich nicht nur optisch gut, sie ist für den Gegner auch schwer einzuschätzen. Kognitionsforscher der Queen's-Universität in Belfast vermuten, dass unser Sehsinn mit rotierenden Bällen wenig anzufangen weiß, da dergleichen in der Natur nicht vorkommt. Es nutzt auch nichts, die Physik dahinter zu verstehen: Indem ein Spieler den Ball nicht mittig trifft, versetzt er ihn in Rotation. Wo das Leder sich wegdreht, also in die Richtung der von vorn anströmenden Luft, wird diese beschleunigt und umgekehrt. So entsteht ein Luftdruckunterschied zwischen beiden Seiten, der die Flugbahn krümmt.

▶ **Pakistan produziert etwa 80 Prozent aller Fußbälle** dieser Welt, das sind 40 bis 43 Millionen pro Jahr. Pro Ball benötigen die Näher zirka drei Stunden und verdienen dabei 60 Cent. Um Kinderarbeit einzuschränken, beauftragen einige Sportartikelkonzerne nur noch Firmen, die ihre Arbeiter zentral in großen Fabrikhallen unter kontrollierten Arbeitsbedingungen beschäftigen. Andere hingegen verlagern die Produktion nach China, wo niedrigere soziale Standards locken. Auch die neuen Kunststoffbälle bedrohen die Einkommen Zehntausender Pakistani, da sie nicht mehr vernäht, sondern vollautomatisch verklebt werden.

▶ **Völlig glatt wäre ein Fußball unbrauchbar.** Denn eine absolut glatt polierte Stahlkugel schleppt beim Flug große Wirbel mit, die sie abbremsen. Die Rauheiten der Fußballoberfläche dagegen verursachen direkt an der Grenzfläche zur Luft viele winzige kleine Wirbelchen, die sich sehr schnell ablösen und deshalb weit weniger geschwindigkeitsvermindernd wirken.

▶ **Schon 300 bis 400 Jahre v. Chr.** wurde in China eine mit Haaren und Federn gefüllte Lederkugel gekickt. Im mittelalterlichen Europa stopfte man eine solche Hülle oder eine Schweinsblase mit Gras oder Lumpen aus. Erst ab 1863, als in England Fußballregeln festgelegt wurden, mussten Bälle rund sein. Dafür sorgten luftgefüllte Gummiblasen. Doch der abdichtende Knoten verformte die Lederhülle und machte Kopfbälle riskant. Dieses Problem lösten Ventile im Jahr 1963.

ADIDAS; SPIELER: EMDE-GRAFIK / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Neue Zähne aus der Retorte

Eigentlich sind Zähne winzige Organe. Könnte man lebenden Ersatz züchten, hätte dies zugleich Schrittmacherfunktion für die künstliche Erzeugung größerer Organe. Der Weg dahin wird gerade gebahnt.

FOTOS: CARY WOLINSKY; ZUSAMMENSTELLUNG: JEN CHRISTIANSEN

Ein Traumziel von Bioingenieuren ist Zahnersatz aus körpereigenem Material. Bei Mäusen haben Gewebeingenieure bereits künstliche Zahnkeime erstellt.

Von Paul T. Sharpe und Conan S. Young

Wir halten sie für selbstverständlich – bis sie weg sind oder größere Reparaturen brauchen. Dann bleibt nur die Wahl, entweder mit ein paar Zähnen weniger auszukommen oder sich leblosen Ersatz einbauen zu lassen. Schätzungsweise 85 Prozent aller Erwachsenen in den westlichen Industrieländern haben irgendeine Form der Zahnbehandlung hinter sich. Sieben Prozent der Siebzehnjährigen fehlt schon mindestens ein bleibender Zahn und nach dem 50. Lebensjahr sind es im Durchschnitt bereits zwölf Stück.

Der beste Ersatz wäre theoretisch ein natürlicher Zahn, gezüchtet aus dem eigenen Gewebe des Patienten und an der ursprünglichen Stelle eingewachsen. Aber viele Jahre blieb dies kaum mehr als ein Traumziel der Biotechnologie. In jüngster Zeit jedoch ist das Wissen darüber, wie sich die ersten Zähne entwickeln, erheblich gewachsen. Dies führt in Verbindung mit den Fortschritten der Stammzellforschung und Gewebezucht dazu, dass biologisch erzeugte Ersatzzähne nun in den Bereich des Möglichen rücken.

Von dem potenziellen Nutzen bei Zahnverlusten einmal abgesehen – man hat hier auch ein geeignetes Objekt, um das Grundkonzept von Zuchtorganen am Menschen zu prüfen. Denn Zähne sind leicht zugänglich und wenn sie auch unsere Lebensqualität stark verbessern, wir kommen doch notfalls ohne sie aus. Beide Punkte mögen trivial erscheinen, aber bei den Bestrebungen, ganz allgemein Ersatzorgane zu züchten und dann klinisch zu testen, werden Zähne einen Testfall darstellen, auch was die Anwendbarkeit verschiedener Gewebezuchtverfahren anbelangt. Wenn es um Ersatz für lebenswichtige Organe geht, dürfen sich Ärzte keinen Fehler erlauben. Mit Zähnen dagegen wären erste Fehlschläge nicht lebensbedrohlich und im Nachhinein noch korrigierbar.

Das heißt aber nicht, dass ihre biotechnologische Herstellung einfach wäre. Die komplizierten Vorgänge im Embryo, durch die Organe einschließlich der Zähne entstehen, haben sich in Millionen Jahren der Evolution entwickelt und werden strikt genetisch gesteuert; sie nachzuvollziehen, bleibt für die Gewebeingenieure eine Herausforderung.

Schon sechs Wochen nach der Befruchtung – der menschliche Embryo ist dann knapp zwei Zentimeter groß und nimmt erste erkennbare Gestalt an – wird durch ständigen Informationsaustausch zwischen den Zellen unter anderem die Bildung der Zähne angeregt und in die richtigen Bahnen gelenkt. Der verwickelte Signalaustausch bei derartigen Prozessen ist einer der Gründe, warum sich bisher weder ein kompletter Zahn noch etwa ein ganzes Herz in Laborkulturschalen züchten lässt. Vielleicht wird es nie gelingen, diese Bedingungen in vollem Umfang künstlich nachzuvollziehen. Aber mit zunehmendem Verständnis der frühen Entwicklungsvorgänge steigen die Aussichten, gezüchtetem Zahngewebe die wichtigsten Anhaltspunkte für den Aufbau der endgültigen Struktur mitgeben zu können – den Rest müsste dann die Natur erledigen.

Die meisten Organe entstehen durch Wechselwirkungen zwischen so genannten Epithel- und Mesenchymzellen des Embryos; auch die Zähne machen da keine Ausnahme. So schicken Zellen des embryonalen Mundepithels (was später die Mundhöhle auskleidet) erste Induktionssignale an jene Mesenchymzellen, aus denen Kieferknochen und weiches Gewebe hervorgehen. Haben diese den Anstoß erhalten, mit der Zahnbildung zu beginnen, schicken sie ihrerseits Signale an die Epithelzellen. Dieser Austausch setzt sich während der gesamten embryonalen Zahnentwicklung fort (siehe Kasten auf der rechten Seite).

Anfangs ist der künftige Zahn nicht mehr als eine Verdickung im Mundepithel. Dieser Keim wächst im weiteren Verlauf in das darunterliegende Mesenchym ein, das sich seinerseits um ihn herum verdichtet. In der siebten Woche der Embryonalentwicklung hat sich so eine Zahnknospe gebildet. Beim weiteren Vordringen stülpt sich das Epithel über das verdichtete Mesenchym und umschließt es dann ungefähr in der 14. Woche wie eine Käseglocke. Letztendlich entsteht aus ihrer Innenseite der Zahnschmelz, die harte Außenschicht des Zahns, die sechs bis zwölf Monate nach der Geburt durch das Zahnfleisch bricht. Aus den Mesenchymzellen sind währenddessen die von außen unsichtbaren Teile hervorgegangen: das Zahnbein (Dentin), das Zahnmark (Pulpa), der Zahnzement und das Parodontalligament, ein Band, das den Zahn mit dem Kieferknochen verbindet (siehe Abbildung links unten im Kasten rechts).

Noch ehe ein Zahn mit der Entwicklung beginnt, ist seine Grundform vorherbestimmt

Noch bevor ein Zahn mit der Entwicklung beginnt, ist sein Typ, seine Grundform, vorherbestimmt – durch den Ort. Einige der Signale aus dem Epithel, welche die Zahnbildung einleiten, steuern gleichzeitig auch eine wichtige Klasse von Genen im Mesenchym des Kiefers. Diese so genannten Homöobox-Gene bestimmen überall im Embryo mit über Form und Lage von Organen und Körperanhängen. Wenn sich beispielsweise die menschlichen Kiefer entwickeln, werden in den einzelnen Bereichen unterschiedliche Homöobox-Gene aktiviert. Je nach Kombination schlägt die ▷

IN KÜRZE

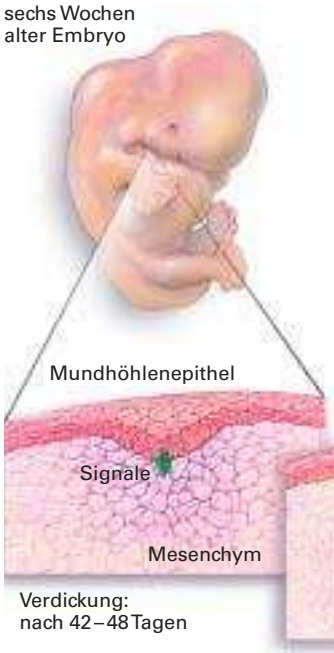
▶ Nach dem Vorbild der Natur arbeiten Gewebezüchter an der **Herstellung lebender Ersatzzähne**. Zellen unterschiedlicher Typen sollen durch Signalaustausch ein funktionsfähiges Organ erzeugen.

▶ Bei zwei Methoden geht es entweder um den Aufbau von Zähnen aus vorhandenen Dentalzellen oder um die **Zucht aus Vorläufergewebe**. Mit beiden Ansätzen entstanden bereits korrekt strukturierte Zähne, allerdings ohne Wurzeln.

▶ Auch, welches Ausgangsmaterial sich für biologisch erzeugte menschliche Zähne am besten eignet, bleibt noch zu ermitteln. Der rasche Fortschritt aber könnte **Zähne aus der Retorte** zum ersten biotechnologisch erzeugten Organ machen.

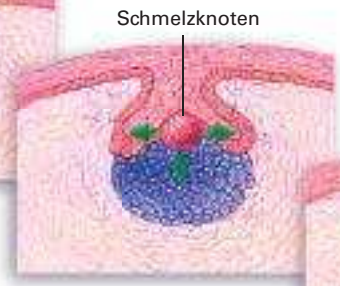
Wie die Natur einen Zahn baut

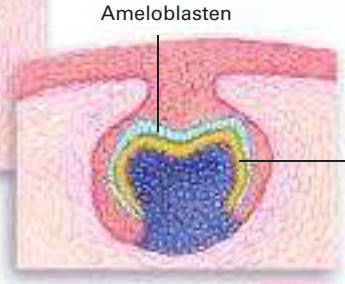
Äußerlich eher simpel, ist ein Zahn in Wirklichkeit ein konstruktives Meisterwerk. Vom Embryo bis zum Kleinkind braucht er zur vollständigen Entwicklung ungefähr 14 Monate. Zwei Typen von Embryonalgewebe erzeugen in einem ständigen molekularen Dialog die Anlage für einen Zahn und lenken die weiteren Prozesse. Diese Signale und die einzelnen Schritte werden heute eingehend untersucht, um die wesentlichen davon zu ermitteln und bei der Zucht lebender Ersatzzähne nachzuvollziehen.



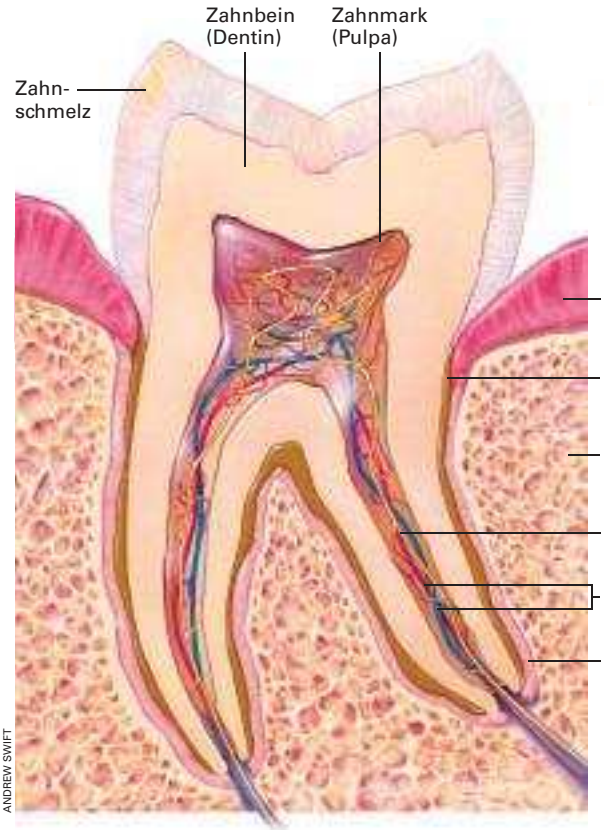
Zahnbildung

Schon in der sechsten bis siebten Woche der Embryonalentwicklung, wenn der gesamte Kopf noch Gestalt annimmt, wird die Bildung von Zähnen eingeleitet. Am Ort des späteren Zahns verdickt sich das Mundepithel etwas und aktiv werdende Gene in seinen Zellen erzeugen Signale für das darunterliegende Mesenchymgewebe. Auf das weitere Vordringen des Epithels reagiert das Mesenchymgewebe mit eigenen Signalen; außerdem verdichtet es sich rund um die Verdickung zu einer Zahnknospe. Bis zur neunten Woche hat sich das Epithel über der kondensierten Masse zur Zahnkappe entwickelt. Der Schmelzknoten, der sich in ihrem Zentrum gebildet hat, dient jetzt als wichtige Quelle für Signale, welche die Aktivität der Epithel- und Mesenchymzellen steuern. Nach 14 Wochen hat der Zahnkeim sich zur Zahnglocke entwickelt. Diese enthält Ameloblasten, Zellen, die sich differenzieren und später zum Zahnschmelz werden, sowie Odontoblasten, die das Zahnbein (Dentin) hervorbringen. Als Letztes beginnt die Entwicklung von Zahnwurzeln. Sie wird abgeschlossen, wenn der Zahn sechs bis zwölf Monate nach der Geburt durchbricht.





Durchbruch durch das Zahnfleisch: 6–12 Monate nach der Geburt



ANDREW SWIFT

Das Ergebnis

Ein lebender Zahn ist per Definition ein Organ: Er besteht aus mehreren Gewebetypen, die jeweils eigene, unentbehrliche Funktionen erfüllen. Umhüllt wird er an seinen exponierten Flächen vom Zahnschmelz, der härtesten mineralischen Substanz des Organismus. Die Hauptmasse darunter besteht aus dem knochenartigen Dentin, dem Zahnbein, das auch als Stoßdämpfer für die Kaukräfte dient. Die Pulpa, das Zahnmark, enthält Blutgefäße für die Nährstoffversorgung sowie sensorische Nerven. An den Flächen ohne Zahnschmelz bildet der Zahnzement eine harte Außenschicht. Zwischen ihm und dem Kieferknochen liegt das bindegewebige Parodontalligament; diese Wurzelhaut verankert den Zahn mit einer gewissen Flexibilität an seinem Platz.

▷ Zahnknospe den Weg zu einem Backen-, Eck- oder Schneidezahn ein.

An den Stellen, wo die hinteren Backenzähne heranwachsen sollen, wird beispielsweise in den Mesenchymzellen ein Homöobox-Gen namens *Barx1* eingeschaltet. Tut man das im Tierexperiment am künftigen Ort eines Schneidezahns, bekommt der die Gestalt eines Backenzahns. Solche Kenntnisse sind entscheidend: Wer Zähne biotechnologisch erzeugen will, muss ihre Form im Voraus bestimmen können, und anhand der Aktivität von Genen wie *Barx1* lässt sich bei der »Vorkultur« im Labor ihre Gestalt definitiv voraussagen.

Umgekehrt heißt das: Wir müssen die entstehenden Zähne auch zur richtigen Zeit mit den richtigen Signalen versorgen. Schon in den 1960er Jahren begannen Wissenschaftler wie Shirley Glastone vom Strangeways Research Laboratory im englischen Cambridge mit Mäusegewebe zu experimentieren, um herauszufinden, ob man Zähne künstlich züchten kann. Aufschlussreiche Arbeiten folgten in den drei Jahrzehnten danach. So brachte man winzige abgetrennte Stücke des embryonalen Zahnepithels und -mesenchyms von Mäusen zusammen und ließ das neue »Kombigewebe« dann entweder in einer Kulturschale heranwachsen oder verpflanzte es in ein Wirtstier, wo es dann auch mit Blut versorgt wurde. Tatsächlich entwickelten sich derartige Zahnanlagen noch etwas weiter, brachten Dentin und Zahnschmelz hervor. Alsbald aber trat Stillstand ein; vollständige Zähne entstanden nie. Irgendetwas fehlte in ihrem fremden Umfeld.

Höchstwahrscheinlich liefert ihnen normalerweise das umgebende Gewebe des embryonalen Kiefers, was sie sonst noch an Wachstumsfaktoren und anderen Signale brauchen. Das scheinbar Einfachste wäre demnach, Zahnanlagen in den Kiefer einzupflanzen, damit sie dort ihre Entwicklung abschließen können. Zu züchtende Ersatzzähne würde man im Idealfall beispielsweise schon in ihrer vorgesehenen Position heranwachsen lassen, sodass sie die Verbindungen mit Nerven und Blutgefäßen sowie die Verankerung im Kieferknochen auszubilden vermögen. Aber der Kiefer bietet im ausgewachsenen Zustand ein ganz anderes Umfeld als im Embryonalstadium, und es war ungewiss, ob er einem sich entwickelnden Zahn die richtigen Signale liefern würde.

Zur Herstellung von Zahnanlagen braucht man natürlich die richtige Kombination von Zellen; nur dann bilden sich Zähne, die in Material und Aufbau dem natürlichen Gegenstück gleichen. Günstiger als embryonale Zellen wären patienteneigene, denn diese würde das Immunsystem nicht als fremd erkennen und abstoßen.

Es war ungewiss, ob der ausgewachsene Kiefer die zur Zahnbildung nötigen Signale liefern würde

Die Zucht von Ersatzzähnen ist daher überhaupt nur unter drei Voraussetzungen möglich:

▶ Man muss eine Quelle für Zellen finden, die leicht aus dem Patienten zu gewinnen sind und Zähne hervorbringen können.

▶ Die aus solchen Zellen erzeugbaren Zähne müssen sich im Umfeld des ausgewachsenen Kiefers vollständig entwickeln und Wurzeln bilden können, die durch ein funktionsfähiges Parodontalligament mit dem Kieferknochen verbunden sind.

▶ Größe und Form des biologischen Ersatzes müssen sich vorherbestimmen und steuern lassen, damit er zu den natürlichen Zähnen des Patienten passt.

Das sind ehrgeizige Ziele, aber in allen drei Bereichen machen inzwischen verschiedene Arbeitsgruppen mit etwas unterschiedlichen Ansätzen beträchtliche Fortschritte.

Einer dieser Ansätze stützt sich auf eine Idee, auf die der Transplantationschirurg Joseph P. Vacanti von der Harvard Medical School und der Polymerchemiker Robert S. Langer vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge gegen Ende der 1980er Jahre gekommen waren. Sie brachten Zellen eines Organs oder Gewebes auf ein vorfabriziertes biologisch abbaubares Gerüst auf und versuchten so Gewebe und Organe für Transplantationen zu züchten (siehe ihre Artikel im SdW-Spezial 4/1995, S. 80 und Spezial 4/1999, S. 26).

Vereinfacht ausgedrückt, gingen sie dabei von der Erkenntnis aus, dass die Zellen eines lebenden Gewebes untereinander ständig Signale austauschen und sich häufig in ihrer dreidimensionalen Lebensgemeinschaft auch bedarfsgerecht umlagern. Offensichtlich »kennt« jede Zelle ihren Platz und ihre Funktion in der größeren Gemeinschaft, die das funktionsfähige Gewebe bildet und erhält. Bringt man die richtige Mischung von Einzelzellen in ein Gerüst, das ihre natürliche räumliche Anordnung nachstellt, sollten sie somit aus eigenem Antrieb wieder das Gewebe oder Organ bilden, zu dem sie ursprünglich gehört haben.

Erste Erfolge erzielten Vacanti und Langer bei der Regeneration von kleinen

Stücken Lebergewebe aus einzelnen Leberzellen. Mit ihrer Strategie wurden seither umfangreiche Experimente durchgeführt, um weitere komplexe Gewebe zu erzeugen, wie Herzmuskulatur, Darmwand, mineralisierte Knochen oder eben auch Zähne. So begannen Pamela C. Yelick und John D. Bartlett vom Forsyth-Institut in Boston zusammen mit Vacanti im Jahr 2000 zu untersuchen, ob man Zähne auf diese Weise herstellen kann. Dabei konzentrierten sie sich auf Schweine. Diese Tiere bringen – anders als Mäuse – wie Menschen zweimal im Lauf ihres Lebens ein Gebiss hervor: zuerst ein Milchgebiss, dann das endgültige.

An diesen Experimenten war auch einer von uns (Young) beteiligt. Als Ausgangsmaterial dienten die Knospen der dritten hinteren Backenzähne (diese entsprechen unseren Weisheitszähnen) von sechs Monate alten Schweinen. Die Gewebe wurden in feine Stückchen zerlegt und dann mit Enzymen weiter aufgelöst. Daraus gewannen wir schließlich eine Zufallsmischung von Zellen des Zahnschmelz-Epithels und des Pulpa-Mesenchyms. Die Mixtur wurde in unsere Grundgerüste »ausgesät«, die aus biologisch abbaubarem Polyesterkunststoff bestanden. Sie waren geformt wie menschliche Schneide- oder Backenzähne und mit einer zellfreundlichen Haftschicht versehen. Das Ganze wurde in Ratten verpflanzt und dabei in deren Darmnetz eingewickelt, eine fettreiche, weißliche »Haut«, die reich an Blutgefäßen ist und das Gedärm umgibt. Dieser Schritt ist wichtig, denn das entstehende Zahngewebe muss zum Wachsen über das Blut ausreichend mit Nährstoffen und Sauerstoff versorgt werden.

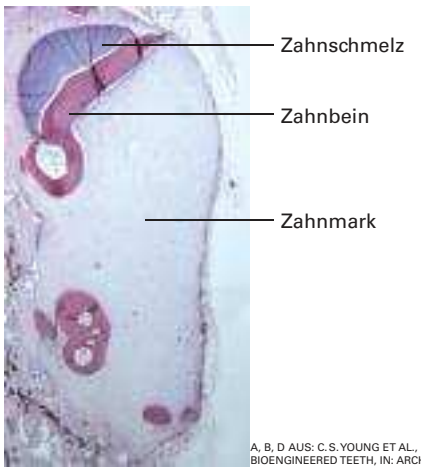
Ein Gerüst plus das richtige Zellgemisch

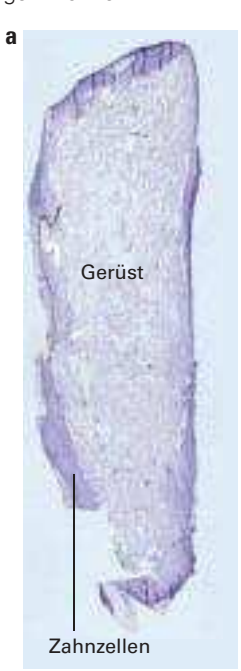
Anfangs diente das Gerüst den Zellen als Stütze, aber später löste es sich wie geplant auf und neues Gewebe trat an seine Stelle. Nach 20 bis 30 Wochen waren darin winzige zahnartige Strukturen zu erkennen, die in Form und Gewebeaufbau den natürlichen Zahnkronen ähnelten (siehe Abbildung unten). Sie enthielten fast alle Gewebetypen ihrer natürlichen Vorbilder. Damit war erstmals der Beweis erbracht, dass Zahnschmelz, Zahnbein, Pulpa und Gebilde, die wie entstehende Zahnwurzeln aussehen, sich in Gerüststrukturen regenerieren lassen.

Möglicherweise hatte sich das Gemisch aus Zahnzellen auf dem Gerüst so umzuorganisieren vermocht, dass eine geeignete Anordnung zur Bildung von mineralisiertem Zahnschmelz und weichem Zahngewebe entstand. Vielleicht aber waren unter den beliebigen Aggregaten ausgesäter Zellen zufällig solche, die eine Zahnentwicklung begünstigten. Um dies zu prüfen, nahm die Arbeitsgruppe am Forsyth-Institut eine neue Untersuchung in Angriff, und zwar mit Zahnepithel- und Mesenchymzellen aus Knospen der verschiedenen Backenzähne von Ratten. Diesmal wurden die Zellen erst sechs Tage lang in Kultur vermehrt und säuberlich vereinzelt, bevor die Forscher sie auf Gerüste aussäten und Ratten einpflanzten. Nach zwölf Wochen hatten sich wiederum kleine zahnähnliche Strukturen mit Zahnschmelz, Zahnbein und Pulpa entwickelt. ▷

Zahnbildung durch wiedervereinigte Zellen

Isolierte Zellen aus den Zähnen heranwachsender Schweine wurden auf einem biologisch abbaubaren Gerüst ausgesät; sie sind nach einer Entwicklungszeit von einer Woche im Gewebeschnitt als blauer Rand zu erkennen (a). Nach 25 Wochen Wachstum hat sich das Gerüst aufgelöst, und an seiner Stelle sind verteilt Zahnschmelz, -bein und -mark zu sehen (b). Bei einer solchen Versuchsreihe wuchsen zwischen derartigen Geweben winzige, zahnähnliche Strukturen heran, wovon bis zu 20 Prozent eine korrekte Gewebeorganisation aufwiesen, einschließlich der Hertwig-Epithelwurzelscheide (c), aus der später die Zahnwurzeln hervorgehen. In den anderen Fällen waren die Zähne falsch oder unvollständig aufgebaut (d). Die künstlich herangezüchteten Zähne bestätigen offenbar, dass aus dem Verband gerissene Dentalzellen sich wieder zu einem größeren Zahngewebe zusammenlagern können.





CONAN S. YOUNG

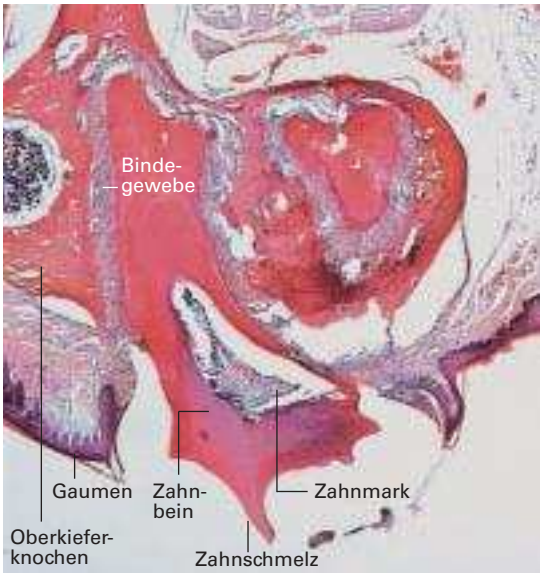
A, B, D AUS: C.S. YOUNG ET AL., DEVELOPMENTAL ANALYSIS AND COMPUTER MODELLING OF BIOENGINEERED TEETH, IN: ARCHIVES OF ORAL BIOLOGY, BD. 50, S. 259–265, 2005; MIT FRDL. GEN. VON ELSEVIER

▷ Diese neuen Ergebnisse sprachen erfreulicherweise deutlicher für ein Reorganisationsvermögen – also dafür, dass zuvor getrennte Zellen sich von selbst wieder zu zahnbildenden Konfigurationen formieren. Außerdem hatte die vorgeschaltete Vermehrung in Kultur sie offensichtlich nicht beeinträchtigt – was für die Herstellung biologischer Ersatzzähne wesentlich ist, denn das Saatmaterial muss man wahrscheinlich aus kleinen, dem Patienten entnommenen Proben erst einmal in ausreichender Menge heranzüchten. Und nicht zuletzt zeigte das Experiment, dass die Zahnregeneration auch bei einem weiteren Säugetier möglich ist, was Erfolge beim Menschen wahrscheinlicher macht.

Zwar gelang es dem Forsyth-Team, etwa im Fall der heranwachsenden Schweine, aus so genannten adulten, also nicht mehr embryonalen Zellen die meisten gewünschten Typen von Gewebe zu erzeugen – doch das richtige, einem natürlichen Zahn entsprechende Arrangement untereinander erreichten die Gewebe nur in 15 bis 20 Prozent der Fälle. Die einzelnen Gebilde blieben überdies sehr klein. Deshalb arbeitet die Gruppe daran, verschiedene Typen dentaler Zellen in dem Gerüst präziser zu positionieren, damit sich die Zahnstruktur realitätsgetreuer nachbildet.

Verpflanzter Zahn

Ein Mäusezahn, herangewachsen aus einer transplantierten Backenzahnanlage: Der Gewebeschnitt (oben eine Übersicht) beweist, dass sich neue Zähne auch im ausgewachsenen Kiefer entwickeln können, sogar an einer Stelle, die sonst keine Zähne trägt. Der Zahn in der Mitte (rechts) ist bereits durchgebrochen, rechts oberhalb davon entwickelt sich ein zweiter aus einer weiteren transplantierten Anlage. Hartgewebe wie Schmelz, Zahnbein und Zement sind rot eingefärbt, das Mark erscheint heller. Der Zahn besitzt zwar keine Wurzel, ist aber über Bindegewebe mit dem Kieferknochen verbunden.



MATT BRADMAN

Künstliche Zahnkeime aus Knochenmark

Gleichzeitig geht das Team einer anderen Frage nach. Denn denkbar ist, dass die beobachteten Gewebe nicht allein dank des Reorganisationsvermögens der getrennten Saatzellen entstanden sind. Möglicherweise enthielten die Knospen der dritten bleibenden Backenzähne, aus denen die Saatzellen gewonnen wurden, versteckte Stammzellen, die dann auch für die Neubildung von Gewebe gesorgt haben könnten. Wenn dem so ist, dann dürften wohl neue dentale Stammzellen, die fast alle erforderlichen Gewebetypen eines gezüchteten Zahns hervorbringen können, in den Nicht-Milchzähnen selbst existieren – zumindest so lange, bis in jungen Erwachsenenjahren die Weisheitszähne durchbrechen. Solche vielseitigen adulten Stammzellen könnten die Bestrebungen zur gerüstbasierten Zucht von Zähnen sicher vereinfachen – und dürften ebenso die Vorgehensweise des anderen von uns (Sharpe) erleichtern.

Sein Team am Londoner King's College favorisiert eine Strategie, die sich stärker an die natürliche Zahnentwicklung im Embryo anlehnt. Diese Methode setzt im Wesentlichen voraus, dass man die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten kennt, die über die Anfangsphase der Zahnentwicklung bestimmen; außerdem braucht man eine Quelle für Zellen, welche die Funktion des embryonalen Mundepithels und Mesenchyms übernehmen.

Bisher hat Sharpes Gruppe in erster Linie verschiedene Typen von Mäusezellen daraufhin untersucht, welche Möglichkeiten zur Zucht von Ersatzzähnen in ihnen stecken. Das Spektrum umfasste Stammzellen wie gewöhnliche Zellen, jeweils embryonale wie adulte. Darunter befand sich auch eine natürliche Mixtur von Zellen des reifen Knochenmarks, in dem bekanntlich Stammzellen zu einem ganz geringen Prozentsatz enthalten sind.

Meist wurden die Ersatz-Mesenchymzellen zunächst in einer Zentrifuge »geschleudert«, bis sie eine kleine, feste Masse bildeten. Ein solches Klümpchen wurde dann mit Epithel überdeckt, mehrere Tage weitergezüchtet und beispielsweise einer Maus unter die Nierenkapsel verpflanzt, die eine ausreichende Blutversorgung bietet. Dort durften sich die Gebilde weiterentwickeln. Außerdem prüften die Wissenschaftler das Gewebe auf die typischen Genaktivitäten der frühen Zahnentwicklung.

Bei solchen Experimenten ließen sich nur dann klare Anzeichen einer Zahnbildung beobachten, wenn das Epithel aus einem Embryo stammte und die Population der getesteten nicht dentalen Mesenchymzellen wenigstens eine geringe Zahl von Stammzellen enthielt. Interessanterweise funktionierte Knochenmark mit seinen ganz wenigen adulten Stammzellen gut: Aus den transplantierten Konstrukten gingen ordnungsgemäß gebaute Zähne hervor. Anscheinend lässt sich also das embryonale Mesenchym bei der Zucht neuer Zähne durch adulte Stammzellen ersetzen.

Anders das embryonale Epithel: Sharpes Gruppe sucht noch immer nach einer adulten Zellpopulation, die dafür als Ersatz dienen könnte. Es stellt eine besondere Kombination chemischer Signale für die Zahnentwicklung bereit, die nach der Geburt im Mundbereich leider verschwinden.

Immerhin aber haben die künstlich zusammengestellten Zahnanlagen – aus einer Kombination von embryonalem Mundepithel und Knochenmarkstammzellen – bereits höchst ermutigende Ergebnisse geliefert. Vor allem lagen die so entstandenen Zähne im normalen Größenspektrum von Mäusezähnen. Sie waren überdies von neuem Knochen- und Bindegewebe umgeben und zeigten sogar erste Anzeichen für die Ausbildung von Zahnwurzeln.

Könnte das aber auch im Mund gelingen? Im embryonalen Kiefer entwickeln sich weiches Gewebe, Zähne und Knochen gemeinsam, ohne durch Kauen und – bei Menschen – durch Sprechen belastet zu werden. Der adulte Kiefer dagegen wird stark strapaziert. Würde er die erforderlichen Signale liefern, damit Zähne sich wie beim Embryo entwickeln und in ihr Umfeld einpassen könnten?

Um das zunächst einmal prinzipiell festzustellen, verpflanzte Sharpes Gruppe die Zahnknospen von Mäuseembryonen in den Mund ausgewachsener Artgenossen, und zwar in den bei Mäusen zahnlosen Bereich zwischen Nage- und Backenzähnen. Dazu wurden dort im weichen Gewebe kleine Schnitte angebracht, die Knospen hineingesteckt und mit chirurgischem Klebstoff an ihrem Platz fixiert. Anschließend erhielten die Tiere nur weiche Nahrung. Bereits drei Wochen später waren in der Lücke eindeutig Zähne zu erkennen. Sie besaßen die richtige Orientierung sowie die mäusetypische Größe und waren durch Bindegewebe mit dem darunterliegenden Knochen verbunden (siehe Bild links oben).

Vorprogrammiert zum Backenzahn

Demnach kann der Mund offensichtlich auch im Erwachsenenalter ein geeignetes Umfeld für die Zahnentwicklung bieten. Aber das ist nur eine der drei aufgeführten wichtigen Voraussetzungen für die Zucht von Ersatzzähnen. Und auf dem Weg zum biologischen Zahnersatz für Menschen dürfte sich noch manches unerwartete Hindernis auftun.

Zwar hat man im Vergleich zu den Bestrebungen, andere Organe künstlich zu züchten, bei Zähnen in kurzer Zeit beträchtliche Fortschritte erzielt. Es bleibt aber die große Aufgabe, einfache und gleichzeitig gut steuerbare Methoden zu entwickeln. Immerhin sind wir inzwischen dicht an unserem dritten Ziel: die Vorausplanung und Steuerung von Größe und Form der Zähne. Die Anlagen von Schneidezähnen und hinteren Backenzähnen lassen sich in einer Kultur leicht an ihrem Aussehen und ihrer Genaktivität unterscheiden, schwieriger ist dies jedoch im Fall der anderen Formen im menschlichen Gebiss wie der vorderen Backenzähne und der Eckzähne.

Die künstlich in der Gebisslücke herangewachsenen Zähne von Mäusen entwickelten eine herkunftsgemäße Form: Eine embryonale Anlage für einen Backenzahn brachte auch im fremden erwachsenen Kiefer eine entsprechend geformte Struktur hervor. Da das Gewebe die gestaltbestimmenden Signale gleich zu Anfang der natürlichen Zahnentwicklung erhält, sind die transplantierten Zahnkeime bereits vorprogrammiert gewesen. Gewebsingenieure müssen daher diese frühen Signale besser verstehen lernen, damit sie im Fall menschlicher Zuchtzähne die gewünschte Form induzieren können.

Mit keiner der hier beschriebenen Gewebezuchtmethoden ließen sich bislang Zähne mit richtigen Wurzeln erzeugen. Deren Entwicklung sowie die Reize, die für das Durchbrechen der Zähne sorgen, sind kompliziert und bisher nur unzureichend aufgeklärt. Die Wurzeln bilden sich recht spät, vollständig sogar erst während des Durchbrechens. Welche Bedingungen dies bei einem biologischen Ersatzzahn am besten begünstigen, bleibt noch zu ergründen.

Unbekannt ist überdies, wie lange künstlich herangezüchtete Zähne bis zur kompletten Entwicklung im Mund brauchen würden. Selbst die zweiten, die bleibenden Zähne des Menschen werden bereits während der Embryonalentwicklung angelegt – doch erst nach sechs bis sieben Jahren kommen die ersten davon endlich zum Vorschein, die Weisheitszähne sogar erst nach etwa 20 Jahren. Nach unserer Erfahrung im Tierexperiment dürfte ein gezüchteter menschlicher Zahn viel schneller Gestalt annehmen, ob aber seine vollständige Reifung und das Aushärten des Zahnschmelzes möglicherweise länger dauern, wissen wir nicht.

Natürlich geht es bei den meisten Forschungen zur künstlichen Zucht von Zähnen auch darum, eine leistungsfähige, leicht zugängliche Quelle für patienteneigene Zellen zu finden, die dann als Ausgangsmaterial dienen können. Einerseits wäre so eine Immunabstoßung zu vermeiden, andererseits würden die künstlich gezüchteten Zähne denen des Patienten stärker ähneln, weil Größe, Farbe und Form genetisch festgelegt sind. Nach den Befunden von Sharpes Arbeitsgruppe können adulte mesenchymale Stammzellen aus dem Knochenmark (und möglicherweise auch aus Fettgewebe) an die Stelle des embryonalen dentalen Mesenchyms treten. Noch wurde kein Ersatz für das embryonale Epithel entdeckt, man hat aber angeblich adulte Stammzellen in Haut und Haarwurzeln gefunden, also in Geweben ebenfalls epithelialer Herkunft. Diese oder andere adulte Zellen mögen vielleicht mit gentechnischer Nachhilfe dazu im Stande sein, die richtigen Auslösesignale für die Zahnentwicklung zu liefern.

Die bequemste potenzielle Zellquelle hierfür sind unter Umständen die Zähne selbst. Die Befunde der Arbeitsgruppe am Forsyth-Institut lassen darauf schließen, dass darin Stammzellen vorhanden sein könnten, die Dentalgewebe einschließlich des Zahnschmelzes zu bilden vermögen. Wie andere Wissenschaftler zudem festgestellt haben, machen Zahnbein und andere Dentalgewebe nach einer Verletzung eine gewisse natürliche Regeneration durch. Auch das lässt auf Vorläuferzellen schließen, die verschiedene Zahngewebe hervorbringen können. In nicht allzu ferner Zeit wird man daher vielleicht aus alten Zähnen einfach neue herstellen. ◁

Paul T. Sharpe (oben) ist Dickinson-Professor für Kraniofaziale Biologie am King's College und leitet die von ihm etablierte Abteilung für Gesichts- und Schädelentwicklung am Londoner Guy's Hospital. Im Jahr 2001 gründete er das Biotechnologieunternehmen Odontis, das menschliche Knochen und Zähne durch Nachvollziehen der Embryonalprozesse heranzüchten will. **Conan S. Young** ist Dozent für orale und Entwicklungsbiologie an der Harvard-Universität und wissenschaftlicher Mitarbeiter des Forsyth-Instituts in Boston, wo er versucht, Zähne aus Zellen zu züchten, die auf einem biologisch abbaubaren Gerüst ausgesät wurden.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Bioengineered teeth from cultured rat tooth bud cells. Von M. T. Duailibi et al. in: Journal of Dental Research, Bd. 83, Nr. 7, S. 523, Juli 2004

Stem cell based tissue engineering of murine teeth. Von A. Ohazama et al. in: Journal of Dental Research, Bd. 83, Nr. 7, S. 518, Juli 2004

The cutting edge of mammalian development. How the embryo makes teeth. Von A. S. Tucker und P. T. Sharpe in: Nature Reviews Genetics, Bd. 5, Nr. 7, S. 499, Juli 2004

Tissue enineering of complex tooth structures on biodegradable polymer scaffolds. Von C. S. Young et al. in: Journal of Dental Research, Bd. 81, Nr. 10, S. 695, Okt. 2002

Nützliche Winzlinge

Bei Kamelen wurden vor einigen Jahren ungewöhnlich kleine und einfache Arten von Antikörpern entdeckt. Die daraus abgeleiteten »Nanobodys« könnten den konventionellen Antikörpern bei therapeutischen Anwendungen den Rang ablaufen.

Von W. Wayt Gibbs

Biologische Zauberkugeln sollten sie sein, molekulare Lenkwaffen, die präzise ihr therapeutisches Angriffsziel finden: einheitliche, »monoklonale« Antikörper, eigens gezüchtet für die Behandlung von Krebs und anderen schweren Erkrankungen. Erst vor rund zehn Jahren begann ihre Karriere. Dutzende neuartige MAks, so das Kürzel, werden derzeit entwickelt oder bereits am Menschen geprüft.

Trotz viel versprechender Erfolge ist die Therapie mit Antikörpern nach wie vor sehr teuer und teils problematisch. Nach Angaben von Medco Health Solutions, einer amerikanischen Arzneimittelvertriebsgesellschaft, schlägt beispielsweise das Antikörperpräparat Xolair für einen Asthmapatienten mit jährlich 11 000 Dollar zu Buche. Acht Dosen Remicade, gegen rheumatoide Arthritis, kosten 4600 Dollar, eine einjährige Therapie mit Herceptin, einem Antikörper zur Brustkrebstherapie, verschlingt 38 000 Dollar.

Die Gründe für diese enormen Medikamentenkosten sind großenteils in der Komplexität dieser Eiweißstoffe zu suchen. In molekularen Größenordnungen betrachtet sind Antikörper wahre Riesen, zusammengesetzt aus zwei schweren und zwei leichten Proteinketten, die in ausgeklügelter Weise räumlich gefaltet sind und besondere Zuckerseitenketten tragen (siehe links im Kasten unten).

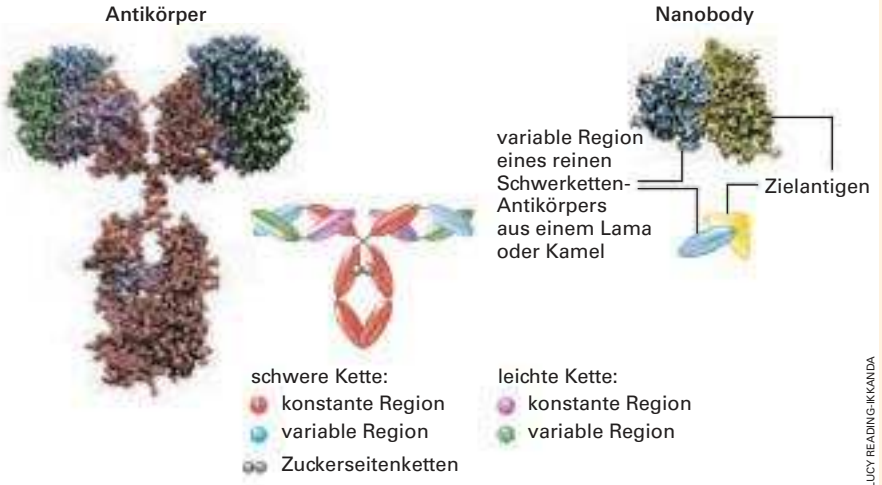
Dies will Ablynx, eine vier Jahre alte Biotech-Firma in Belgien, ändern. Das Unternehmen, angesiedelt außerhalb von Gent, hat ein ehrgeiziges Ziel: das kleinstmögliche Proteinfragment zu finden, das die Funktion eines vollständigen Antikörpers erfüllt, und dann daraus das erste »Nanobody-Medikament« zu entwickeln. Nanobodys sind mit wenigen Nanometern Länge (millionstel Millimeter) nur ein Zehntel so groß wie normale Antikörper und vergleichsweise einfach aufgebaut. Der Name ist eine Verkürzung aus lateinisch *nanus* für Zwerg und dem englischen *antibody*. Voraussichtlich Anfang 2007 wird Ablynx mit ersten klinischen Studien zu zwei seiner Entwicklungen beginnen.

Möglicherweise gelingt es mit der Technologie eines Tages, Medikamente gegen die Alzheimer-Demenz und andere Krankheiten zu entwickeln, die mit gewöhnlichen Antikörpern nicht therapiert werden können. Dies sei jedoch nicht das primäre Ziel, betont Mark Vaeck, der Geschäftsführer der Firma, denn zunächst wollen die Ablynx-Forscher Nanobodys entwickeln, die das gleiche tun wie einige der heutigen Bestseller unter den Antikörpern, nur effektiver.

Ihnen kommen dabei Einblicke in die einzigartige Immunbiologie der Ka-

Anatomie eines Antikörpers

Die Standardantikörper, die das menschliche Immunsystem in millionenfacher Variation vorbringt, besitzen alle die gleiche Grundstruktur. Zwei längere (schwere) Proteinketten und zwei kürzere (leichte) Ketten bilden zusammen eine Y-förmige Struktur. Die paarweise vorhandenen variablen Abschnitte an den Enden der Arme bestimmen, an welche Zielstruktur ein Antikörper sich bindet. Nanobodys sind miniaturisierte Verwandte: Sie bestehen nur noch aus dem variablen Segment von reinen Schwerketten-Antikörpern, die zuerst bei Kamelen entdeckt wurden. Sie sind lediglich ein Zehntel so groß wie gewöhnliche Antikörper.



LUCY READING-IKKANDA

melfamilie zugute. Die Entwicklung eines üblichen therapeutischen MAks beginnt normalerweise mit Mäuse-Antikörpern, die durch Manipulation der entsprechenden Gene »vermenschlicht« werden (siehe oben im Kastens S. 64). Dabei ersetzen die Wissenschaftler einen mehr oder weniger großen Teil der DNA-Sequenzen durch entsprechende Abschnitte aus menschlichen Antikörpergenen. (Einige Firmen verfügen sogar über genmanipulierte Mäuse, die direkt fast humanidentische Versionen produzieren.)

Sperrige Lenkwaffen

Die Humanisierung reduziert die Gefahr schwerer Nebenwirkungen, die auftreten können, wenn das Immunsystem des Patienten die verabreichten Fremdantikörper für feindliche Invasoren hält und angreift. Häufig erfordert dieser Umbau jedoch viele Monate anspruchsvoller gentechnologischer Arbeiten. Die resultierenden Makromoleküle sind so groß und komplex, dass sie sich nicht wie niedermolekulare Pharmaka auf chemischem Weg synthetisieren lassen. Stattdessen muss man sie in Bioreaktoren mit Säugerzellen erzeugen, denen die jeweiligen Antikörpergene eingepflanzt wurden.

Derartige Zellkulturen im Großmaßstab als Produzenten einzusetzen, erfordert einigen Aufwand. Daher sind die Produktionsanlagen erheblich teurer als vergleichbare Einrichtungen für die chemische oder bakterielle Synthese von Arzneimitteln. Zum Beispiel muss sichergestellt sein, dass keine Viren eingeschleppt werden, welche die wertvollen Zellkulturen zerstören und die Antikörperpräparate kontaminieren würden. Nach einer Analyse übersteigt die Nachfrage nach therapeutischen Antikörpern die verfügbaren Produktionskapazitäten in den kommenden Jahren höchstwahrscheinlich bei Weitem. All diese Umstände treiben die Kosten der Antikörpertherapien in die Höhe.

Die schiere Größe der Antikörper begrenzt ihre Einsatzmöglichkeiten sowohl in medizinischer als auch in rein praktischer Hinsicht. So verlieren MAks bei zu hohen Temperaturen oder extremen pH-Werten ihre korrekte räumliche Faltung. Sie werden gewöhnlich bereits binnen Wochen wertlos, lagert man sie nicht im Kühlschrank. Mehr noch: Im Magen-Darm-Trakt werden sie rasch abgebaut, können die Blut-Hirn-Schranke nicht überwinden und dringen nur in die Randzone von Geschwülsten vor. Viele Erkrankungen lassen sich daher überhaupt nicht mit MAks behandeln, und wenn doch, müssen die Patienten zur Verabreichung der Präparate in die Klinik kommen.

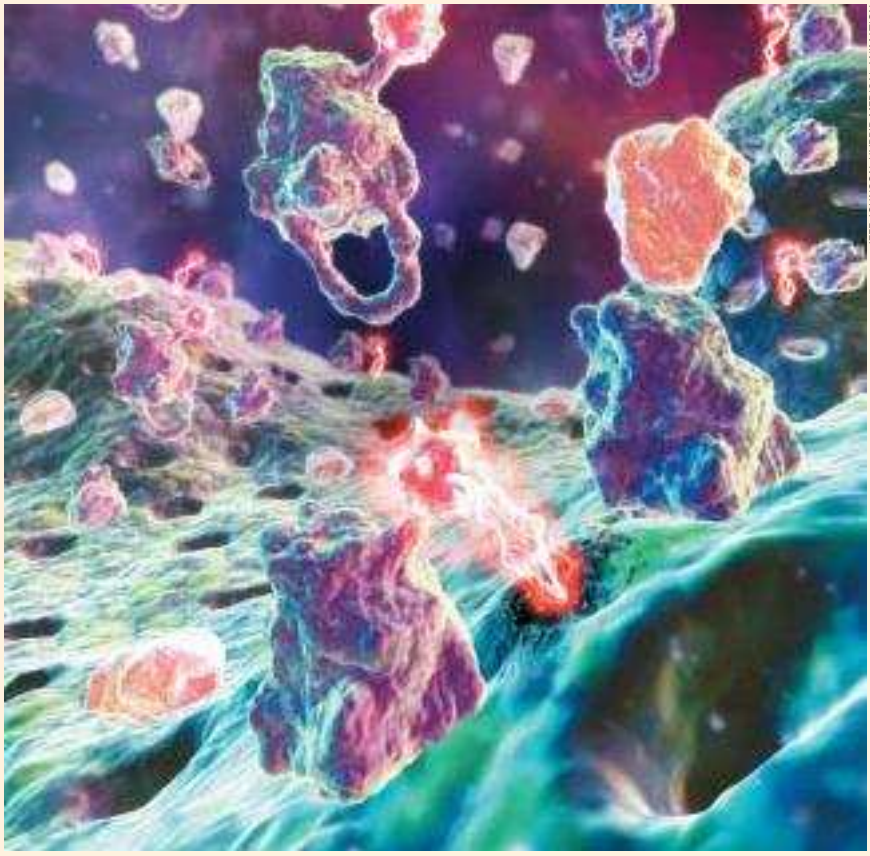
Für bestimmte Leiden, bei denen die Therapie mit monoklonalen Antikörpern bisher noch nicht gut funktioniert, oder selbst für einige der etablierten Anwendungen wären kleinere, simplere Proteine möglicherweise besser wirksam, leichter herzustellen und einfacher zu verabreichen. All das senkt die Kosten. Diese Erkenntnis ist nicht neu. Proteiningenieure begannen daher schon in den 1980er Jahren mit Antikörperfragmenten zu experimentieren. Dabei entfernten sie zum Beispiel den Stamm der Y-förmigen Moleküle oder sogar den Stamm samt einem Arm, wenn der andere mit seiner »Hand« für die gewünschten Zwecke reichte.

Wie die intakten Antikörper können diese Fragmente (Fachleute sprechen von Fabs) Toxine, Krankheitserreger oder fehlgeleitete zelluläre Signalmoleküle abfangen beziehungsweise deren Rezeptoren blockieren. Da ihnen der Stamm fehlt, sind sie aber nicht mehr richtig in der Lage, andere Komponenten des Immunsystems wie zum Beispiel T-Killerzellen zum Ort des Geschehens zu lenken.

Dennoch weisen diese gestutzten Gebilde einige Vorzüge auf. So lassen sie sich in kultivierten Bakterien, Hefen oder Pilzzellen herstellen, was wesentlich kostengünstiger ist als Mäuse- oder Hamsterzellen, die für die Produktion kompletter Antikörper benötigt werden. Fabs dringen überdies bis in das Innere von Tumoren vor und können eine angekoppelte zelltoxische Fracht wie Radionuklide oder Cytostatika direkt in das erkrankte Gewebe transportieren.

Leider denaturieren Fabs gewöhnlich leicht oder werden rasch aus dem Blutstrom herausgefiltert. Ihre biologische ▷

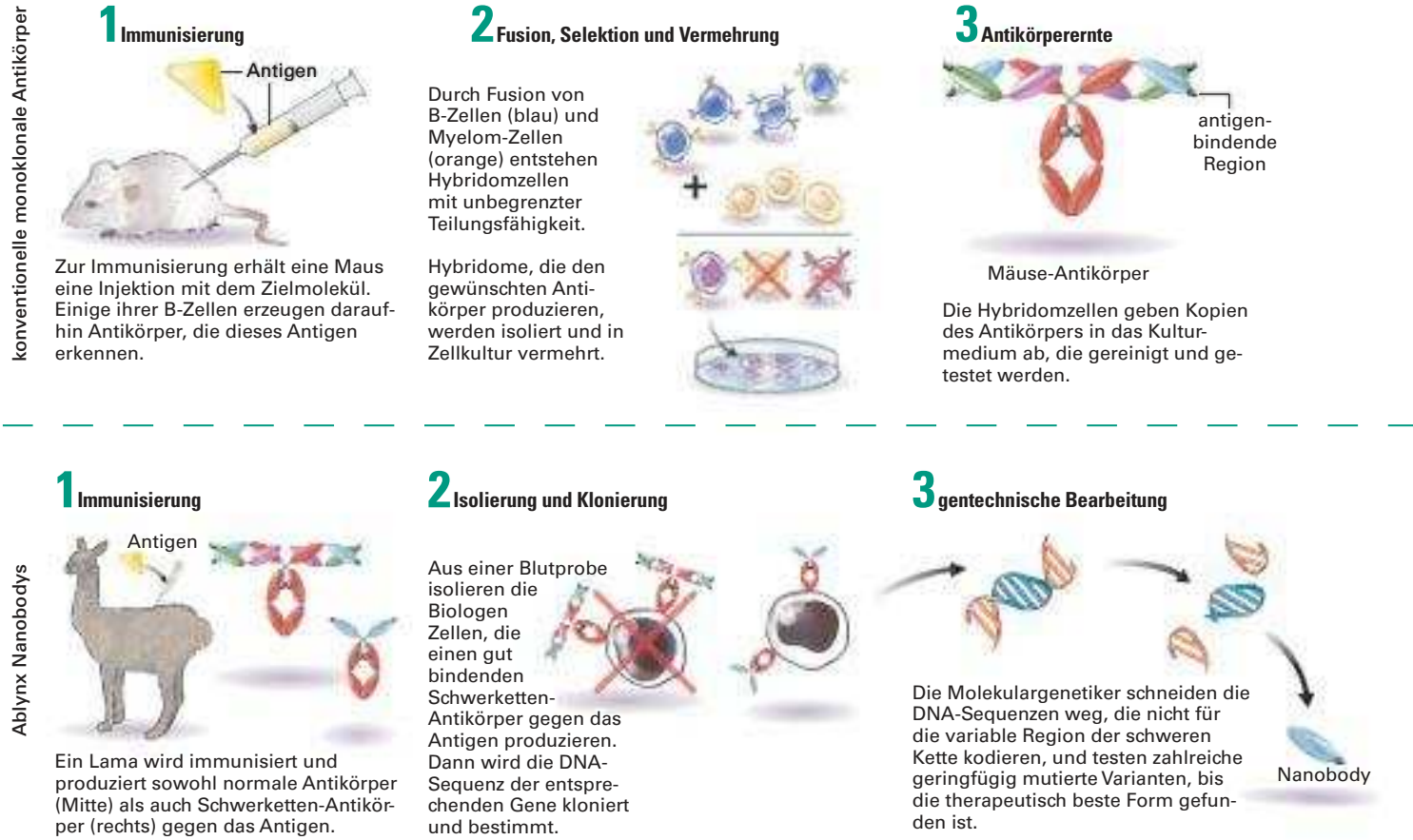
Verschiedene potenzielle Nanobodys stürmen hier auf eine Krebszelle (blaugrün) ein. Einige dieser Mini-Antikörper (violett) richten sich gegen Andockstellen auf der Zelloberfläche und schirmen wachstumsfördernde Signale (orange) ab. Andere führen radioaktive Substanzen (keulenförmige Anhänge) an krebsspezifische Strukturen heran.



JEFF JOHNSON, HYBRID MEDICAL ANIMATION

Wie erzeugt man Antikörper und Nanobodys?

Nanobodys sind wesentlich schneller und kostengünstiger herzustellen als konventionelle therapeutische monoklonale Antikörper. In beiden Fällen erzeugt das Immunsystem eines lebenden Tieres das initiale »Design« eines Antikörperproteins, das ein bestimmtes Zielmolekül (Antigen) erkennt. Molekulargenetiker verändern dann die Erbsubstanz DNA, die für den Antikörper kodiert, um ihm therapeutisch erwünschte Eigenschaften zu verleihen.



▷ Halbwertszeit bemisst sich daher typischerweise eher nach Stunden als nach Wochen wie bei vollständigen Antikörpermolekülen. Sollen Fabs nur eine Medikamentenfracht an den Wirkort bringen, kann die rasche Elimination ungebundener Moleküle erwünscht sein. Bei den meisten übrigen Anwendungen ist sie jedoch von Nachteil.

Einigen Unternehmen wie der Firma Domantics in Cambridge (Massachusetts) ist es gelungen, die Fabs noch weiter zurückzustutzen: bis auf das äußere Ende nur einer der beiden Ketten im Arm. Dieser Abschnitt, der bei jedem Antikörper einzigartig ist, enthält gewissermaßen die variablen »Proteinfinger«. Sie bestimmen, welche Zielstruktur, welches Antigen, der Antikörper erkennt und wie stark die Bindung zwischen beiden ist. Domänen-Antikörper, wie Domantics seine Gebilde nennt, sind ähnlich klein wie die Nanobodys von Ablynx.

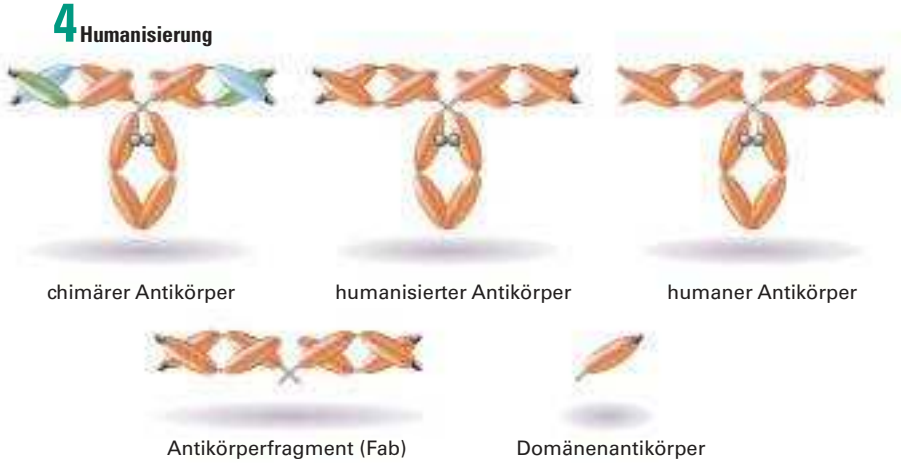
Eine Zufallsentdeckung

Da es sich aber um Abschnitte handelt, die sich eigentlich mit anderen innerhalb des größeren zweikettigen Arms zusammenlagern, exponieren sie nun »klebrige« Oberflächen, erklärt Serge Muyldermans, Proteinbiologe an der Freien Universität Brüssel. Bereits in den Bakterien, die sie produzieren, verklumpen die Domänenfragmente, und dasselbe geschieht auch im Körper von Patienten. Die Klebrigkeit dieser Moleküle mindert demnach die Ausbeute und ist auch hinderlich bei dem, was sie tun sollen.

Während Biochemiker damit beschäftigt sind, Antikörperfragmente zur Vermeidung solcher Probleme umzukonstruieren, setzt Ablynx auf eine natürliche Alternative. Muyldermans untersuchte 1989 in der Forschungsgruppe von Raymond Hamers an der Freien Universität Brüssel etwas Merkwürdiges, das bei einem Studentenprojekt zu Mechanismen der Parasitenabwehr bei Dromedaren und Wasserbüffeln aufgetaucht war. Zunächst glaubte die Gruppe an einen Fehler. Doch dann bestätigte sich tatsächlich, dass die einhöckrigen Kamele neben ihren normalen Antikörpern aus zwei leichten und zwei schweren Proteinketten auch über einfachere Varianten verfügen, die lediglich aus zwei schweren Ketten bestehen.

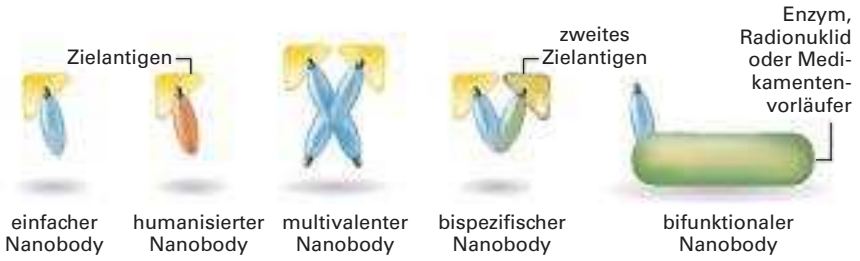
Nach einigen Jahren genauerer Erforschung publizierten Hamers, Muyldermans und ihre Kollegen 1993 die Zufallsentdeckung in der Fachzeitschrift »Na-

4 Humanisierung



Um den tierischen Antikörper zu »vermenschlichen« werden auf Genebene große Teile durch die entsprechenden Gen-abschnitte humaner Antikörper (orange) ersetzt. Auch lassen sich so Antikörperfragmente verschiedener Größe herstellen.

4 Konstruktion therapeutischer Nanobodys



Nanobody-Gene lassen sich mit anderen fusionieren, die für weitere Nanobodys oder nützliche Proteine kodieren, und in Kulturen von Hefen oder Pilzen erzeugen. Man kann beispielsweise auch Radionuklide ankoppeln.

LUCY READING-IKKANDA

ture«. Bei Dromedaren – und auch bei den zweihöckrigen asiatischen Trampeltieren und den in Südamerika heimischen Lamas – enthält etwa die Hälfte der Antikörper im Blut nur schwere Proteinketten. Überraschenderweise heften sich diese »unvollständigen« Antikörper genauso gut an ihr Antigen wie komplette Pendants, obwohl sie nur über halb so viele Proteinfinger verfügen, und im Gegensatz zu Fabs neigen die Schwerketten-Antikörper auch nicht zum Verklumpen.

Weshalb unter den Säugetieren nur Mitglieder der Kamelfamilie über diese besondere Art von Antikörpern verfügen, ist noch unklar. Doch die Natur bietet hier womöglich den Wissenschaftlern die Chance, einige der Schwierigkeiten mit herkömmlichen Antikörpern oder deren Fragmenten zu umgehen. Als das Team von Muyldermans diese Schwerketten-Antikörper bis auf ihre spezifischen, variablen Abschnitte verkürzte, behielten sie eine erstaunlich hohe Affinität zu ihrem Antigen; sie war fast so hoch wie die der zehnfach größeren normalen Antikörper.

Dank der viel einfacheren Zusammensetzung lassen sich Nanobodys in Mikroben erzeugen

Die verkürzten Proteine konnten zudem dorthin gelangen, wo der Zugang für normale Antikörper zu eng ist, etwa in die katalytischen Taschen von Enzymen oder in den Bindungsspalt von Rezeptoren. Die Nanobodys waren geboren, und kurz darauf folgte Ablynx.

Da Nanobodys so viel kleiner sind als konventionelle Antikörper und im Gegensatz zu Domänenantikörpern keine Wasser meidenden Oberflächen besitzen, machen ihnen Temperatur- und pH-Extreme weniger aus. Selbst nach der Passage durch den Magen-Darmtrakt von Mäusen waren sie noch aktiv, wie Pieter Rottiers und Hilde Revets vom Flandrischen Institut für Biotechnologie in Brüssel nachwiesen. Somit besteht Aussicht, dass man sie in Pillenform verabreichen kann, um im Darm entzündliche Erkrankungen (Morbus Crohn), Krebs oder andere Probleme zu behandeln.

Dank ihrer viel einfacheren Zusammensetzung bedarf es zu ihrer Herstellung nur eines einzigen Gens und »williger« Mikroben als Produzenten. Forscher der Firma Unilever in den Niederlanden gewannen 2002 aus einem Bioreaktor mit 15 000 Litern Hefekultur mehr als ein Kilogramm Nanobodys (dies entspricht einer Ausbeute von 67 Millligramm Nanobody-Protein pro Liter Kultur). Im vergangenen Jahr gelang es dann den Wissenschaftlern bei Ablynx, die Ausbeute auf über 1 Gramm pro Liter Kultur zu steigern. Dies liegt weit über der typischen Rate kompletter Antikörper.

»Weiteres Plus: unsere Nanobodys sind bei Raumtemperatur stabil, können also lange ungekühlt aufbewahrt werden«, versichert Tim Vanhauwermeiren, zuständig für die Geschäftsentwicklung bei Ablynx. Moleküle mit neuer Spezifität herzustellen sei außerdem mit dem Nanobody-System einfacher und damit schneller und kostengünstiger als bei konventionellen Antikörpern (siehe untere Hälfte im Kastens oben). Werden Lamas mit dem Zielantigen immunisiert, dann die gebildeten Schwerketten-Antikörper aus ihrem Blut extrahiert, »können wir zu hochaffinen Nanobodys vier Monate nach Erhalt des reinen Antigens gelangen«, sagt Vanhauwermeiren. Bei manchen Erkrankungen wie der rheumatoiden Arthritis mögen bereits »nackte« Nanobodys therapeutisch nützlich sein, die entweder unerwünschte Signalmoleküle abfangen oder deren Andockstellen ▷

▷ an Rezeptoren der Zelloberfläche verstopfen.

Einer der entscheidenden Vorteile von Nanobodys liege jedoch darin, dass sie sich relativ einfach miteinander oder mit anderen Molekülen verknüpfen lassen, erklärt Hans De Haard, der wissenschaftliche Leiter von Ablynx. Sein Team testete Fusionsmoleküle aus zwei verschiedenen Nanobodys: Der eine richtet sich gegen das Bluteiweiß Albumin, der andere gegen eine therapeutische Zielstruktur. Mit diesem Kunstgriff verlängerte sich die Halbwertszeit der Nanobodys im Blut auf Wochen. Sie stellten auch so genannte multivalente Kombimoleküle aus bis zu vier Nanobodys her, die gemeinsam entweder mehr Antigen pro Molekül abfangen oder sich an zwei Zielstrukturen gleichzeitig heften – oder an jeweils eine davon.

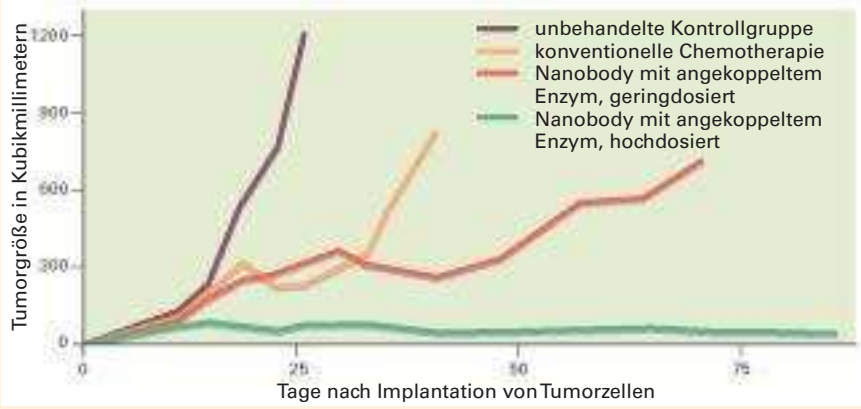
Vor Kurzem publizierten Revets, Muyldermans und Patrick de Baetselier vom Flandrischen Institut für Biotechnologie eindrucksvolle Ergebnisse eines Experiments zur Tumortherapie mit Nanobodys. Die Moleküle richten sich gegen einen Rezeptor auf Tumorzellen und waren mit einem speziellen Enzym gekoppelt. Es verwandelt eine später verabreichte Vorstufe des eigentlichen Medikaments (Prodrug genannt) in ein aktives Chemotherapeutikum, das Zellen in der näheren Umgebung abtötet.

Die »Patienten« in diesem Experiment waren Mäuse, denen die Wissenschaftler menschliche Krebszellen eingespritzt hatten. Im Körper der Wirte wuchsen die Zellen rasch zu kirschgroßen Tumoren heran. Revets behandelte dann einige der Tiere mit dem Zellgift allein. Diese Gruppe litt wie üblich an erheblichen Nebenwirkungen und verlor an Gewicht, die Tumoren jedoch verkleinerten sich kaum. Eine der weiteren Versuchsgruppen erhielt eine hohe Dosis des Nanobody-Enzym-Gespanns. Nach einer Wartezeit, in der die Tiere noch ungebundene Moleküle ausschieden, injizierten die Forscher die Medikamentenvorstufe. Wie erhofft konzentrierte sich dank der gebundenen Nanobody-Enzym-Gespanne die Wirkung der Chemotherapie auf das Tumorgewebe. Gesundes Gewebe blieb verschont, und die Tumoren bildeten sich vollständig zurück (Grafik unten).

Solange Nanobodys noch nicht in klinischen Studien geprüft sind, bleibt offen, ob dieses Therapieprinzip bei Patienten ebenso gut wirkt. Problematisch wäre es, wenn die Miniaturantikörper vom menschlichen Immunsystem als fremd erkannt würden. Die Wissenschaftler bei Ablynx haben jedoch schon Methoden zur Humanisierung von Nanobodys entworfen. Außerdem zeigte sich bei Tests an Pavianen, dass die Tiere keine Immunantwort gegen die winzigen Lama-Proteine entwickeln. De Haard räumt jedoch ein, dass Nanobodys dem raffinierteren immunologischen Überwachungsnetz des Menschen möglicherweise nicht so einfach entgehen.

Für nächstes Jahr anvisierte Studien zur Sicherheit und Verträglichkeit von Nanobodys bei gesunden Probanden müssen zeigen, ob die Karriere dieser Moleküle mit der gleichen atemberaubenden Geschwindigkeit weitergehen wird wie in letzter Zeit – oder ob die Komplexität unseres Immunsystems sie ausbremst. ◁

▼ Nanobodys gegen Krebs halfen Mäusen, denen man menschliche Tumorzellen implantiert hatte. Eine konventionelle Chemotherapie verzögerte das Wachstum der Tumoren geringfügig. Eine Medikamentenvorstufe, verabreicht nach hochdosierter Gabe eines Antikrebs-Nanobodys mit angekoppeltem Aktivierungsenzym, führte dagegen zur kompletten Rückbildung.



LUCY READING-IKKANDA

W. Wayt Gibbs arbeitet als Wissenschaftsjournalist bei Scientific American.

Nanobodies as novel agents for cancer therapy. Von Hilde Revets, Patrick de Baetselier und Serge Muyldermans in: Expert Opinion on Biological Therapy, Bd. 5, S. 111, 2005

New directions in monoclonal antibodies. Von Mark C. Via. Cambridge Healthtech Advisors, Oktober 2004

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATUR

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Ein Gift gegen starke Schmerzen

Im Tierexperiment unterbindet es die Schmerzweiterleitung tausendmal stärker als Opiate. Inzwischen ist das nachsynthetisierte Toxin einer Meeresschnecke als Medikament zugelassen.

Von Gary Stix

Nichts ahnend schwimmt der Fisch über den Meeresboden. Plötzlich trifft ihn der Giftpfeil einer Kegelschnecke (Foto S. 68). Das Opfer ist in Sekundenschnelle gelähmt und die Schnecke kann es in aller Ruhe verschlingen. Was dem Fisch zum Verhängnis wurde, steckt heute teilweise in einem neuen Medikament, das Patienten mit starken chronischen Schmerzen Hoffnung bietet, wenn anderes nicht (mehr) hilft. Unter dem Handelsnamen Prialt ist es in den USA seit Anfang 2005 auf dem Markt und wurde auch bereits von der Europäischen Arzneimittelbehörde (EMEA) zugelassen.

Sein Wirkstoff, Ziconotid genannt, ist die synthetische Kopie eines Toxins im Giftcocktail der Kegelschnecke *Conus magus*, die im östlichen Pazifik und im Indischen Ozean lebt. Das Miniprotein, das Peptid, unterbricht die Schmerzweiterleitung an das Gehirn, und zwar auf der Ebene des Rückenmarks. Dort laufen über besondere sensorische Nervenfasern elektrische Signale ein, wenn beispielsweise die Haut oder ein Knochen verletzt wird. Vom Rückenmark geht das Signal über nachgeschaltete Nervenzellen ans Gehirn weiter, wo es als Schmerz interpretiert wird.

An den Schaltstellen, den Synapsen, im Rückenmark geschieht Folgendes: Am Ende der Schmerzfaser öffnet das elektrische Nervensignal spezielle Kanäle, die Calcium-Ionen einströmen lassen; dies löst die Abgabe von Botenstoffen aus, die das Signal an die nachgeschaltete Nervenzelle übertragen (siehe Kasten S. 69). Opiate wie Morphin und seine Verwandten entfalten einen Teil ihrer schmerzlindernden Wirkung, indem sie indirekt ein Öffnen so genannter N-Typ-Calcium-Kanäle hemmen. Ziconotid nun heftet sich direkt dort an. Diese Erkenntnis zusammen mit dem Ergebnis, dass es im Tierexperiment weder Gewöhnung noch Sucht erzeugte, lieferte den entscheidenden Schub auf dem geradezu abenteuerlichen Entwicklungsweg bis zum neuartigen Schmerzmedikament.

Anfangs bloß Notlösung

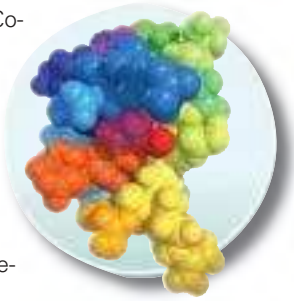
Das Ganze begann Ende der 1960er Jahre, als Baldomero Olivera nach seiner Postdoc-Ausbildung an der kalifornischen Universität Stanford auf die Philippinen zurückkehrte, um dort ein eigenes Labor aufzubauen. Eigentlich wollte er seine Forschungen an einem biotechnologisch wichtigen Enzym fortführen, das DNA-Stücke miteinander verknüpft, aber er konnte die dafür erforderliche Laborausrüstung nicht beschaffen. Daher wandte er sich notgedrungen anderen Fragestellungen zu. Als Sammler von Muschelschalen und Schneckenhäusern kannte er giftige Kegelschnecken. Sollten sie wie manche anderen Gifttiere Moleküle enthalten, die sich zur Blockade jeweils bestimmter Ionenkanäle bei neurowissenschaftlichen Forschungen eignen?

Als er eine Stelle als Hochschullehrer an der Universität von Utah in Salt Lake City erhielt, wollte er die Arbeiten an Schneckentoxinen eigentlich nur noch nebenherlaufen lassen. Doch Craig Clark, ein 19-jähriger Student, der in seinem Labor arbeitete, reizte 1978 das Thema. Was würde passieren, so fragte Clark, ▷

Schnecke hilft Patient

Die Kegelschnecke *Conus magus* injiziert einen Giftcocktail mit Hilfe eines Zähnchens, das als Harpunenspitze dient. Die paralysierte Beute, einen Fisch, zieht sie in ihren dehnbaren Schlund.

Einer der Inhaltsstoffe des Cocktails, ein Omega-Conopeptid aus 25 Aminosäuren, entpuppte sich als schmerzlindernd. Seine synthetisch hergestellte Kopie heißt Ziconotid (rechts) und ist der Wirkstoff eines neuartigen Schmerzmedikaments.



Eine seitlich unter die Haut implantierte Pumpe verabreicht Ziconotid über einen feinen Schlauch direkt in die Rückenmarksflüssigkeit (links). Wegen spezieller Nebenwirkungen verbieten sich intravenöse Gaben.

LUCY READING-IKKANDA; MITTE: KEN EWARD

▷ wenn man nur eines oder nur ein paar der etwa 100 Peptide im Giftcocktail der Kegelschnecke *Conus geographus* direkt in das Gehirn von Mäusen injiziert? Bei früheren Experimenten bekamen die Nager Giftkomponenten dieser auch für Menschen gefährlichen Art in die Bauchhöhle gespritzt. Olivera erwartete keine wesentlichen Erkenntnisse, ließ ihn aber gewähren. Zum Erstaunen aller jedoch lösten die injizierten Peptide ganz unterschiedliche Verhaltensweisen aus: Eines etwa brachte die Tiere zum Zittern, ein anderes zum Schlafen und wieder ein anderes zum Kratzen. Olivera beschloss schließlich, sich nun völlig den Kegelschneckengiften zu widmen.

Die Veröffentlichungen des Teams faszinierten George Miljanich. Der Biochemiker forschte an der Universität von Südkalifornien in Los Angeles über die Signalübertragung an Synapsen, also an neuronalen Schaltstellen. Er wollte mithelfen, dort verschiedene Typen von Calcium-Kanälen zu identifizieren und zu klassifizieren. Kegelschneckengifte, Conotoxine, boten sich dafür als molekulare Sonden an. Er hatte jedoch Probleme, ausreichende Mengen davon zu bekommen. Zwar können Kegelschnecken »gemolken« werden, die Ausbeute bei dieser Prozedur bringt aber kaum mehr als einen Tropfen.

Miljanich nahm schließlich ein Stellenangebot des noch jungen kalifornischen Biotech-Unternehmens Neurex in Menlo Park an. Dort schlug er vor, so genannte Omega-Conopeptide nachzubauen, die spannungsabhängige Calcium-Kanäle an der Synapse blockieren.

Bei Tieren reichte bereits ein Tausendstel der sonst nötigen Opiatdosis

Einige entstammten dem Cocktail der Kegelschnecke *Conus magus*, der für Fische, aber nicht für Menschen gefährlich ist. Die Firma beschäftigte eine Reihe erstklassiger Peptid-Chemiker und stimmte nach einigem Zögern zu. Binnen kurzer Zeit waren sie in der Lage, diese Schneckenmoleküle in Grammmengen herzustellen.

Ein bestimmtes Conopeptid, ursprünglich erstmals in Oliveras Labor isoliert, schien ein besonders interessantes pharmakologisches Potenzial aufzuweisen. Für diese Substanz hatte Miljanich inzwischen eine Liste von Anwendungsmöglichkeiten der daraus eventuell ableitbaren Wirkstoffe erstellt. Die Schmerztherapie stand zunächst nur an dritter Stelle, rückte aber auf, als SNX-111 (das spätere Ziconotid beziehungsweise Prialt) die weiteren Tests für die beiden ersten nicht wie gewünscht bestand.

Hier kam die Erkenntnis ins Spiel, dass sich SNX-111 selektiv an Calcium-Kanäle vom N-Typ heftet und sie am Öffnen hindert, was indirekt auch Morphin tut, wie man damals entdeckte. Mehr noch: Wie anschließende Tierexperimente zeigten, konnte der Medikamentenkandidat dies bereits bei einem Tausendstel der sonst nötigen Opiatdosis erreichen, ohne Gewöhnung oder Sucht hervorzurufen.

Im Jahr 1995 schließlich startete Neurex die klinische Prüfung bei Patienten mit starken chronischen Schmerzen, denen selbst intrathekale Gaben von Opiaten nicht geholfen hatten. Intrathekal bedeutet, dass das Medikament direkt über einen feinen Katheder in die Rückenmarksflüssigkeit eingebracht wird. Das geschieht mit Hilfe einer programmierbaren Pumpe, die dem Patienten implantiert wird. Über sie wurde nun das synthetisch hergestellte Schneckentoxin zugeführt. (Alle Versuche, das aus 25 Aminosäuren bestehende Molekül durch chemische Abwandlung zu optimieren, hatten nichts gebracht.) Wegen der zuvor beobachteten Nebenwirkungen durften nur unheilbar kranke Patienten behandelt werden.

Gleich zu Beginn der Schmerzstudie stellte sich heraus, dass Anfangsdosis und Steigerungsrate zu hoch gewählt waren. Einige Patienten litten unter erheblichen Nebenwirkungen, von Koordinationsstörungen bis hin zu Halluzinationen. In späteren Studien, mit adaptiertem Dosierungsschema, klagten weniger Patienten über Nebenwirkungen. Nicht immer verschwanden diese wieder. Ein Patient zum Beispiel geriet in ein Delirium, das nur

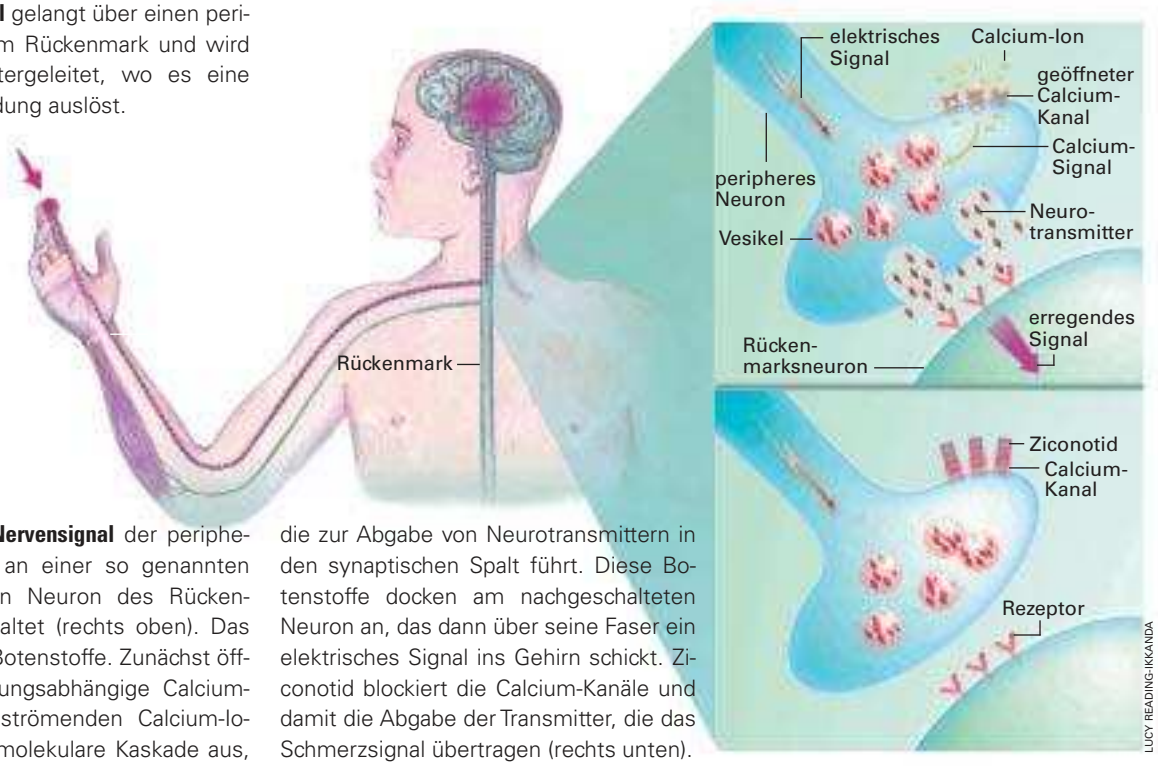
Schneckengift als Biowaffe

Vorübergehend waren die kleinen und relativ leicht herzustellenden Toxine von Kegelschnecken auch als Biowaffen von Interesse. So versuchten russische Forscher, das Gen für ein todbringendes Peptid der Spezies *Conus geographus* in Pockenviren einzubringen. Zum Glück stellte der russische Präsident Boris Jelzin 1992 das Biowaffenprogramm ein, bevor es gelang, den tödlichen Hybriden herzustellen. Die Kegelschnecken mit ihren Toxinen faszinierten auch einen prominenten thailändischen Politiker. Im Jahr 1998 veröffentlichte er unter dem Pseudonym Paul Adirex einen Roman, in dem ein amerikanischer Präsident mit dem Gift der Landkarten-Kegelschnecke ermordet werden soll.

◀ **Füttere die Bestie: Eine Kegelschnecke harpuniert in einem Laboraquarium an der Universität von Utah einen angebotenen Beutefisch.**

Gezielte Linderung

Ein Schmerzsignal gelangt über einen peripheren Nerv zum Rückenmark und wird ins Gehirn weitergeleitet, wo es eine Schmerzempfindung auslöst.



Das elektrische Nervensignal der peripheren Faser wird an einer so genannten Synapse auf ein Neuron des Rückenmarks umgeschaltet (rechts oben). Das geschieht über Botenstoffe. Zunächst öffnen sich spannungsabhängige Calcium-Kanäle. Die einströmenden Calcium-Ionen lösen eine molekulare Kaskade aus, die zur Abgabe von Neurotransmittern in den synaptischen Spalt führt. Diese Botenstoffe docken am nachgeschalteten Neuron an, das dann über seine Faser ein elektrisches Signal ins Gehirn schickt. Ziconotid blockiert die Calcium-Kanäle und damit die Abgabe der Transmitter, die das Schmerzsignal übertragen (rechts unten).

▷ mittels Elektroschocks beendet werden konnte.

1998 akzeptierte Neurex ein Übernahmeangebot des irischen Pharmakonzerns Elan. Zwar hatten zwei klinische Studien ergeben, dass SNX-111 deutlich wirksamer ist als ein Placebo, doch befürchteten die Manager von Neurex, dass die amerikanische Zulassungsbehörde angesichts der Nebenwirkungen eine weitere klinische Studie fordern würde. Elan führte diese Studie durch – mit Erfolg: Am 28. Dezember 2004 erhielt Ziconotid (Medikamentenname nun Prialt) die Zulassung von der amerikanischen und im Februar 2005 von der europäischen Arzneimittelbehörde, unter bestimmten Auflagen.

Denn so segensreich das neue Schmerzmittel auch sein kann, seine Nebenwirkungen sind nicht unerheblich. Häufig treten kognitive und neuropsychiatrische Probleme auf, darunter etwa Gedächtnisstörungen, Verwirrung, Psychosen und manische Reaktionen. Außerdem kann Ziconotid Depressionen hervorrufen oder verstärken. Daher sollten die Patienten, so die Forderung der amerikanischen Arzneimittelbehörde, öfter überprüft werden. Problematisch ist auch die Verabreichung des Medikaments, denn es muss direkt als Lösung ins Rückenmark gelangen (bei intravenöser Gabe verursachte es ein Absacken des Blutdrucks). Somit bleibt es chronischen Schmerzpatienten vorbehalten, wenn die bestehende Behandlung versagt oder schwere Nebenwirkungen verursacht.

Die europäische Behörde verlangt eine so genannte Anwendungsbeobachtung zur langfristigen Wirksamkeit und Sicherheit; beispielsweise könnte es bei längerer Gabe vielleicht doch zu einer Gewöhnung kommen, die höhere Dosen erfordert.

Die Vermarktungsrechte für Europa hat Elan inzwischen an den Pharmakonzern Eisai verkauft und seine eigenen Forschungen an Schneckentoxinen eingestellt. Dennoch könnten weitere Medikamente auf der Basis von Kegelschnecken-Molekülen folgen. Die Vielfalt dieser Tiere und ihrer Gifte ist nämlich enorm. Rund 500 Arten produzieren schätzungsweise mindestens 50 000 verschiedene Conopeptide. (Zum Vergleich: Bisher sind von Pflanzen insgesamt etwa 10 000 Alkaloide bekannt, einige dienen zum Beispiel als Herzmedikamente.) Verschiedene Unternehmen wollen dieses Potenzial nutzen. Olivera war Mitbegründer von Cognetix in Salt Lake City, einer Pharmafirma speziell für conopeptidbasierte Medikamente.

Ziconotid und andere Peptidwirkstoffe mögen in manchen Fällen durch die Entwicklung kleiner organischer Moleküle mit gleichem Angriffsziel abgelöst werden, die sich in Tablettenform einnehmen lassen. Selbst dann dürften aber Conopeptide mit ihrer Vielfalt – einige wirken beispielsweise auf ganz andere Ionenkanäle – ein nützlicher Ausgangspunkt für die Entwicklung neuer Medikamente am Reißbrett sein. ◁

Gary Stix ist Redakteur bei Scientific American.

Ziconotide: Neuronal calcium channel blocker für treating severe chronic pain. Von G.P. Miljanich in: Current Medicinal Chemistry, Dezember 2004, Bd. 11, Nr. 23, S. 3029

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATUR

Urerde – Sauna oder Gluthölle?

Nach der gängigen Vorstellung war die Erdkugel in den ersten 500 Millionen Jahren ein glühender Feuerball. Neue Mineralfunde widersprechen diesem Bild jedoch. Demnach bildeten sich schon damals Ozeane und Kontinente mit günstigen Bedingungen für die Entstehung von Leben.

DON DIXON

Das neue Bild der jungen Erde, wonach schon vor 4,4 Milliarden Jahren Wasserozeane die Oberfläche des Globus bedeckten, unterscheidet sich stark von der glutheißen, feindlichen Welt, die in Lehrbüchern beschworen wird.

Von John W. Valley

Kurz nach ihrer Bildung, vor etwa 4,5 Milliarden Jahren, leuchtete die Erde wie ein matter Stern. Gelb-orangefarben glühende Ozeane aus Magma brodelten an ihrer Oberfläche. Aus dem All schlugen immer wieder riesige Felsbrocken ein – manche so groß wie kleine Planeten. Wenn diese Geschosse mit rund 75facher Schallgeschwindigkeit aufprallten, zerplatzten sie, schmolzen oder verdampften sogar.

Aus den Magmameeren sank das besonders schwere Element Eisen ins Erdinnere ab und bildete dort den metallischen Kern. Dabei setzte es Gravitationsenergie frei, die den Planeten weiter erhitzte. Gleichzeitig erzeugte der Zerfall radioaktiver Elemente in der Tiefe sechsmal so viel Wärme wie heute.

Wärmeisolierende Gesteinshaut

Erst später, als weniger harsche Bedingungen herrschten, konnte das geschmolzene Gestein zu einer Kruste erstarren, Wasser aus der dampfgesättigten Atmosphäre kondensieren und Leben auf dem abgekühlten Planeten keimen. Aber wann war es so weit? Die meisten Wissenschaftler nehmen an, dass die höllische Epoche, die sie nach dem griechischen Wort für die Unterwelt Hadaikum nennen, etwa 500 Millionen Jahre dauerte. Für diese Vermutung spricht, dass bisher keine Gesteine gefunden wurden, deren Alter vier Milliarden Jahre übersteigt. Die ersten fossil erhaltenen Lebensspuren sind sogar noch weit jüngeren Datums.

In den letzten sieben Jahren haben Geologen – darunter meine Gruppe an der Universität von Wisconsin in Madison – jedoch Dutzende sehr alter Kristalle des Minerals Zirkon entdeckt, die mit ihrer chemischen Zusammensetzung ein neues Bild von den Anfängen der Erde zeichnen. Obwohl sie nur etwa so groß sind wie der Punkt am Ende dieses Satzes, haben sie dank ihrer Beständigkeit wertvolle Informationen über die Umweltbedingungen zur Zeit ihrer Entstehung bewahrt. Dazu gehören Hinweise darauf, dass Ozeane, in denen sich einfaches Leben entwickeln konnte, und vielleicht auch Kontinente schon 400 Millionen Jahre früher existierten als bisher gedacht.

Seit dem 19. Jahrhundert haben Wissenschaftler alle möglichen Berechnungen angestellt, um abzuschätzen, wie schnell die Erde abkühlte; denn ein materielles Zeugnis vom Ende dieses Vorgangs erwartete kaum jemand zu finden. Schon vor längerer Zeit gab es dabei einen ersten Hinweis, wonach vielleicht schon ziemlich früh gemäßigte Bedingungen auf unserem Planeten herrschten – auch wenn die Magmaozeane ursprünglich über 1000 Grad Celsius heiß waren. Wie thermodynamische Berechnungen zeigten, könnte die Temperatur nämlich innerhalb von nur 10 Millionen Jahren so weit gesunken sein, dass sich der zunächst flüssige Globus mit einer festen Gesteinskruste überzog. Während diese Erstarrungshaut allmählich dicker wurde, wirkte sie wie eine Wärmeisolierung, welche die Oberfläche gegen die Hitze im Erdinnern abschirmte.

Die Außentemperatur des jungen Planeten könnte so schon bald unter den Siedepunkt von Wasser gesunken sein – vorausgesetzt, es gab längere Ruhephasen zwischen heftigeren Meteoritenbombardements, und die Kruste war stabil. Damals strahlte die noch junge Sonne schwächer als heute. Folglich konnte auch sie die Lufthülle vermutlich nicht genügend aufheizen, obwohl es dort seinerzeit große Mengen an Kohlendioxid gab, das einen starken Treibhauseffekt ausübte.

Dennoch glaubten die meisten Geowissenschaftler weiter an eine lang anhaltende glutheiße Frühphase unseres Planeten. Schließlich ist das früheste bekannte, intakte Gestein, der Acasta-Gneis im Nordwesten Kanadas, nur vier Milliarden Jahre alt. Die ältesten Sedimentgesteine, die aus Ablagerungen unter Wasser – also nachweislich in einer relativ kühlen Umgebung – entstanden sind, bildeten sich sogar erst vor 3,8 Milliarden Jahren. Sie liegen in Isua im Südwesten Grönlands zu Tage und enthalten auch die frühesten Hinweise auf Leben (Spektrum der Wissenschaft 4/2004, S. 70).

Suche nach dem einen Sandkorn am Strand

In den 1980er Jahren entdeckten Wissenschaftler in den Jack Hills und am Mount Narryer in Westaustralien dann einzelne Zirkonkristalle, die sich als ältestes bekanntes irdisches Material entpuppten: Ein Korn war laut Altersbestimmung vor fast 4,3 Milliarden Jahren entstanden.

Dennoch blieb zunächst unklar, welche Schlüsse die Existenz dieser Zirkone erlaubte. Das lag unter anderem daran, dass niemand genau wusste, aus welchem Gestein sie ursprünglich stammten. Zirkonkristalle sind so widerstandsfähig, dass sie sogar erhalten bleiben, wenn ihr Muttergestein an die Oberfläche gelangt und durch Verwitterung und Abtragung zerstört wird. Wind oder Wasser können die verbliebenen Körner dann über große Entfernungen transportieren, bevor sie in Sand- und Kiesablagerungen eingebettet werden, die sich später eventuell zu Sedimentgestein verfestigen. So fanden sich auch die Zirkone aus den Jack Hills – vielleicht Tausende von Kilometern von ihrem Ursprung entfernt – in einer fossilen Kiesschicht, einem so genannten Konglomerat.

Trotz der Begeisterung über die Entdeckung solch uralter irdischer Materialien hielt ich wie die meisten meiner Kollegen zunächst an der Vorstellung fest, dass die junge Erde sehr lange ein Glutofen blieb. Erst als im Jahre 1999 technische Fortschritte eine genauere Untersuchung der westaustralischen Zirkone erlaubten, geriet die überkommene Sicht der frühen Erdgeschichte ernsthaft ins Wanken.

Die uralten Kristalle gaben ihr Geheimnis nur widerstrebend preis. Die Kiesschicht, in der sie sich befinden, ▷

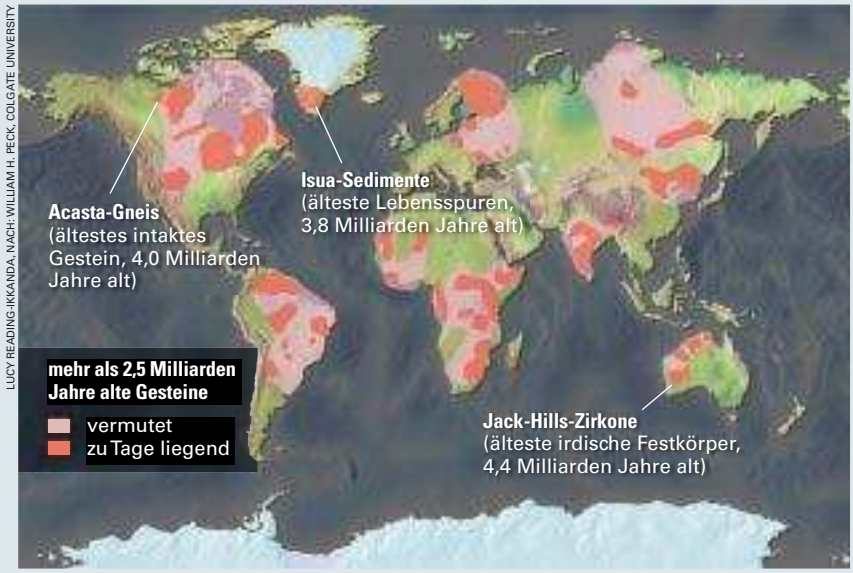
IN KÜRZE

▶ Geologen waren lange der Meinung, dass **die höllischen Bedingungen** bei der Geburt unseres Planeten vor 4,5 Milliarden Jahren lange anhielten und erst vor rund 3,8 Milliarden Jahren freundlichere Verhältnisse herrschten.

▶ Winzige **Kristalle des Minerals Zirkon**, die Rückschlüsse auf Zeitpunkt und Art ihrer Bildung erlauben, legen jetzt jedoch nahe, dass sich **die Erde weitaus schneller abkühlte** und vielleicht schon vor 4,4 Milliarden Jahren die ersten Kontinente entstanden.

▶ Bei einigen Zirkonen weist die chemische Zusammensetzung sogar auf ein feucht-gemäßigtes Milieu hin, wie es für **die Entstehung von Leben** notwendig ist.

Die ältesten Teile unseres Planeten



LUCY READING-IKKANDA, NACH: WILLIAM H. PECK, COLGATE UNIVERSITY

Mehr als 2,5 Milliarden Jahre alte Gesteine treten an vielen Stellen rund um den Globus zu Tage oder liegen unmittelbar unter der Oberfläche (rot). In noch ausgedehnteren Regionen sind sie wahrscheinlich unter jüngeren Gesteinen verborgen (rosa). In einem dieser Gebiete könnten sich vielleicht Zirkonkristalle finden, die ebenso alt sind wie jene, die in den Jack Hills in Westaustralien entdeckt wurden.

BEIDE FOTOS: JOHN W. VALLEY

Das fossile Schotterbett in den Jack Hills (oben) enthält die ältesten Zirkone der Erde. Indem Geologen einige hundert Kilogramm des dortigen Gesteins (unten) zertrümmerten und sortierten, konnten sie zwanzig Kristalle gewinnen, die Anzeichen für ein kühleres Milieu vor mehr als 4 Milliarden Jahren bergen.

▷ wurde vor drei Milliarden Jahren abgelagert und markiert den Nordwestrand einer ausgedehnten Gruppe von Gesteinsformationen, die alle älter als 2,6 Milliarden Jahre sind. Die Gegend um die Jack Hills ist ein staubiges Ödland etwa 800 Kilometer nördlich von Perth, Australiens abgelegenster Stadt. In der Nähe gibt es lediglich zwei riesige Schafzuchtstationen.

Um am Ende weniger als einen Fingerhut voller Zirkone zu gewinnen, mussten meine Kollegen und ich in dieser entlegenen Region mehrere hundert Kilogramm Gestein sammeln, es ins Labor schaffen, dort zertrümmern und die Bruchstücke sortieren. Es war wie die Suche nach wenigen sehr speziellen Sandkörnern an einem Strand.

Vom Herkunftsgestein getrennt, ließen sich die einzelnen Kristalle datieren. Zirkone sind nämlich ideale Zeitmesser: nicht nur extrem beständig, sondern auch mit Spuren radioaktiven Urans »verunreinigt«, das langsam, aber stetig zu Blei zerfällt. Wenn sie aus einem erstarrenden Magma auskristallisieren, verbinden sich Atome von Zirkonium, Silizium und Sauerstoff in einem festen Mengenverhältnis miteinander ($ZrSiO_4$) und bilden dabei ein charakteristisches Kristallgitter. Darin ist vereinzelt statt des Zirkoniums ein Uranatom eingebaut. Bleiatome sind dagegen zu groß, um zwanglos die Stelle irgendeines Elements in dem Kristallgitter einnehmen zu können. Daher enthalten Zirkone zunächst praktisch kein Blei.

Sobald sie auskristallisiert sind, beginnt die radiometrische Uhr zu ticken. Das enthaltene Uran zerfällt dann mit konstanter Rate zu Blei, sodass sich das Mengenverhältnis der beiden Elemente kontinuierlich ändert. Anhand dieser Relation lässt sich das Alter eines unbeschädigten Zirkons deshalb auf ein Prozent genau bestimmen. Für die frühe Erde bedeutet das eine Fehlerspanne von nur etwa 40 Millionen Jahren.

Ionenstrahl sprengt Atome ab

Ein elegantes Verfahren zur Ermittlung des Isotopenverhältnisses haben schon zu Anfang der 1980er Jahre William Compston und seine Kollegen von der Australischen Nationaluniversität in Canberra entwickelt. Es erlaubt, die Untersuchung auf einen kleinen Teil des Kristalls zu beschränken.

Mit einer speziellen Form von Ionenmikrosonde, der die Australier den Namen Shrimp gaben (nach englisch *sensitive high-resolution ion microprobe*), lässt sich ein Ionenstrahl so zielgenau auf die für das bloße Auge fast unsichtbaren Zirkonkristalle feuern, dass er am angepeilten Teil der Oberfläche eine geringe Anzahl von Atomen absprengt. Ein Massenspektrometer sortiert diese Atome dann nach ihren Massen und bestimmt dabei ihr Mengenverhältnis. So konnte Compstons Gruppe – in Zusammenarbeit mit Robert Pidgeon, Simon A. Wilde und John Baxter, alle von der Curtin University of Technology in Perth – 1986 erstmals die Zirkone von den Jack Hills datieren.

Als ich und mein Doktorand William H. Peck gut ein Jahrzehnt später auf der Suche nach Informationen über die Urzeit der Erde waren, wandten wir uns deshalb an die australischen Forscher. Wilde willigte ein, weitere Altersbestimmungen an Zirkonen von den Jack Hills vorzunehmen. Im Mai 1999 analysierte er so mit einem verbesserten Shrimp an der Curtin University 56 undatierte Kristalle.

Fünf davon waren, wie sich herausstellte, mehr als vier Milliarden Jahre alt. Der älteste brachte es sogar auf 4,4 Milliarden Jahre. Einige Gesteinsproben vom Mond haben ein ähnliches Alter. ▷

▷ Meteoriten sind im Allgemeinen sogar noch älter. Doch auf der Erde hatte niemand zuvor ein derart altes Material gefunden. Entsprechend groß war unsere Begeisterung. Dabei ahnten wir nicht, dass uns der aufregendste Befund noch bevorstand.

Hinweis auf gemäßigtes Milieu

Peck und ich interessierten uns für die westaustralischen Zirkone, weil wir eine gut erhaltene Probe vom ältesten Sauerstoff der Erde suchten. Dieses Element gibt es in zwei Varianten, die zwar die gleiche Zahl an Protonen, nämlich acht, aber unterschiedlich viele Neutronen enthalten und deshalb eine etwas andere Masse haben. Das Mengenverhältnis der beiden Atomsorten – Wissenschaftler sprechen von Isotopen – lässt Rückschlüsse darauf zu, bei welcher Temperatur und in welcher Umgebung sich das Gestein gebildet hat. Aus diesem Grund verraten Zirkone nicht nur, wann sie entstanden sind, sondern auch, wo und wie.

Ganz überwiegend besteht Sauerstoff aus dem Isotop mit der Atommasse 16, das acht Neutronen enthält. Dagegen hat Sauerstoff-18, der über zehn Neutronen verfügt, nur einen Anteil von 0,2 Prozent. Das genaue Mengenverhältnis der zwei Atomsorten variiert allerdings leicht je nach der Umgebungstemperatur, bei der sich ein Kristall gebildet hat. Beide Sauerstoffisotope sind stabil, unterliegen also keinem radioaktiven Zerfall und verändern sich nicht mit der Zeit von selbst.

Das $^{18}O/^{16}O$-Verhältnis im Erdmantel – der 2800 Kilometer dicken Schicht unter der nur fünf bis vierzig Kilometer

Spurensuche im Kristall

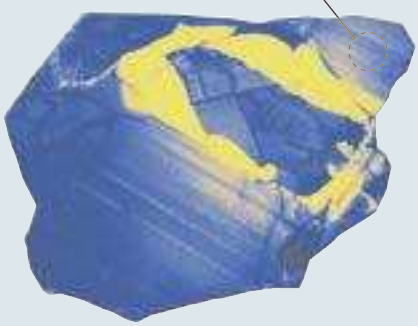
Wissenschaftler können einem einzigen Kristall des Minerals Zirkon gleich mehrere Hinweise auf die Umweltbedingungen auf der frühen Erde entnehmen. Dazu betten sie ihn zunächst in Epoxidharz ein. Dann schleifen und polieren sie ihn, um eine von jüngeren Einflüssen unberührte Oberfläche freizulegen.

Mit einem Rasterelektronenmikroskop ermitteln sie anschließend das Wachstumsmuster des Kristalls und identifizieren eingeschlossene winzige Stücke anderer Minerale. Aufschlussreich sind zum Beispiel Quarzeinschlüsse; denn sie kommen üblicherweise in Zirkonen vor, die in Granit, einem für Kontinente charakteristischen Gestein, gewachsen sind.

Mit einer Ionenmikrosonde analysieren die Forscher dann einzelne Stellen der polierten Oberfläche. Dabei sprengt ein dünner Ionenstrahl von dort eine geringe Zahl von Atomen ab, die anschließend mit einem Spektrometer anhand ihrer Massen identifiziert werden. Um das Alter des Kristalls zu bestimmen, messen Wissenschaftler den Anteil der Atome Uran und Blei. Beide sind als Verunreinigungen im Kristallgitter des Zirkons eingeschlossen. Vereinfacht gesagt, bewirkt der konstante radioaktive Zerfall von Uran zu Blei, dass der Kristall umso älter ist, je mehr Blei im Verhältnis zum Uran er enthält.

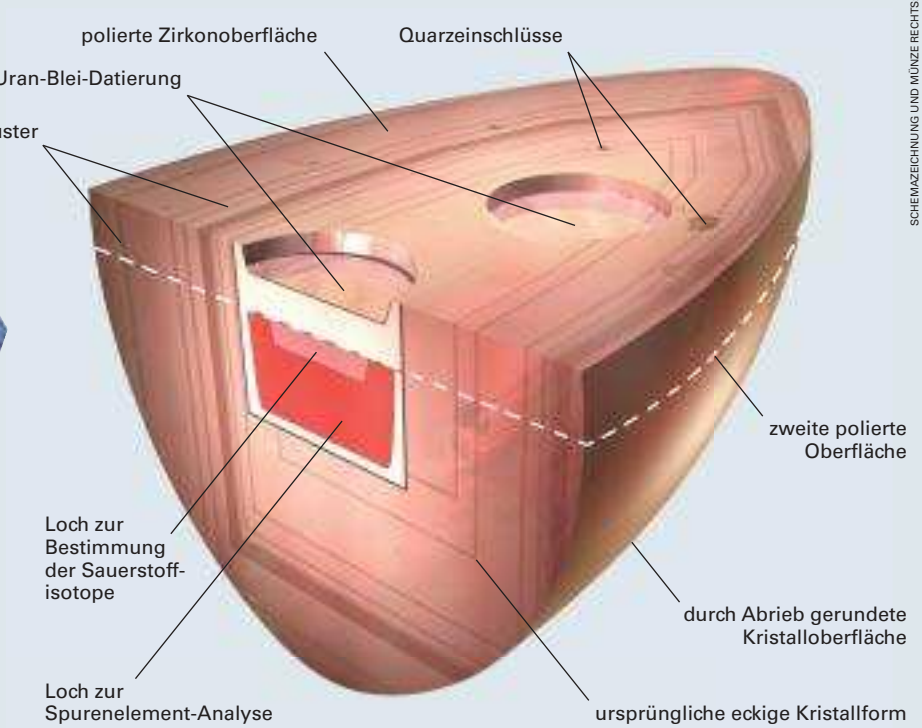
Die Forscher schleifen nun den Zirkon ein Stück weiter ab und legen so eine tiefere Schicht frei. Dort sprengen sie an derselben Stelle wie zuvor Atome ab. Diesmal interessieren sie sich speziell für den Sauerstoff, der regulär im Zirkon enthalten ist. Das Verhältnis gewisser Sauerstoffisotope – Atomsorten mit unterschiedlichen Massen – lässt erkennen, ob das Muttergestein des Kristalls in einer heißen oder kühlen Umgebung gebildet wurde.

Wieder an derselben Stelle lösen die Forscher schließlich noch einmal Atome ab, um die Häufigkeit gewisser Spurenelemente zu messen – Verunreinigungen, die zu weniger als einem Prozent im Kristall vorkommen. Menge und Isotopensignatur einiger dieser Elemente können Hinweise darauf geben, ob das Muttergestein eines Zirkons zu einem alten Kontinent gehörte.



SIMON A. WILDE, CURTIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Der älteste Zirkon der Welt, hier in einer Kathodolumineszenz-Aufnahme, enthält Bereiche, die vor 4,4 Milliarden Jahren entstanden sind.



SCHEMAZEICHNUNG UND MÜNZE RECHTS: ALFRED T. KAMAJIAN, NACH: AARON J. CAVOSIE, UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON

mächtigen Kruste – ist gut bekannt. Man findet es in Magmen, die dort entstehen und dann an der Oberfläche austreten. Der Einfachheit halber geben Geochemiker das Sauerstoffisotopenverhältnis allerdings nicht direkt an, sondern als Abweichung von einem Standard, ausgedrückt durch den so genannten Delta-Wert (δ). Den Bezugspunkt bildet dabei Meerwasser: Sein $\delta^{18}O$ beträgt null. Zirkon im Erdmantel hat dagegen ein $\delta^{18}O$ von 5,3. Sein $^{18}O/^{16}O$-Verhältnis ist demnach größer als das von Meerwasser.

Die roten Zirkone, welche zum Größenvergleich vor Roosevelts Nase auf einer Zehn-US-Cent-Münze fotografiert wurden, kommen aus demselben Gestein, das die ältesten Kristalle der Welt enthielt (oben). Eine Ionenmikrosonde wie diejenige im Labor des Autors an der Universität von Wisconsin in Madison (unten) kann Isotopenverhältnisse oder Spurenelementgehalte von Punkten auf einem Zirkon ermitteln, die 15-mal kleiner sind als der Durchmesser des Kristalls selbst.

Aus diesem Grund erwarteten Peck und ich auch in den Zirkonen von den Jack Hills einen Delta-Wert von ungefähr 5,3. Zur Untersuchung brachten wir die Kristalle von Wilde – darunter auch die fünf ältesten – noch im Sommer 1999 nach Schottland an die Universität Edinburgh. Dort waren uns John Craven und Colin Graham beim Einsatz eines anderen Typs von Ionenmikrosonde behilflich, der sich speziell dafür eignet, Sauerstoffisotopenverhältnisse zu messen.

In den vorangegangenen zehn Jahren hatten wir schon öfter zusammengearbeitet und dabei unsere Technik perfektioniert. Das ermöglichte uns nun, selbst winzigste Proben zu analysieren – nur ein Millionstel so groß wie diejenigen, die ich in meinem eigenen Labor in Wisconsin untersuchen konnte. Nach elf Tagen, in denen wir rund um die Uhr arbeiteten und kaum Schlaf fanden, lagen die Ergebnisse vor – und straften unsere Vorhersagen Lügen: Die $\delta^{18}O$-Werte der Zirkone reichten bis 7,4.

Wir waren perplex. Was konnte dieses hohe Sauerstoffisotopenverhältnis bedeuten? In jüngeren Gesteinen wäre die Antwort klar gewesen; da kommen solche Werte häufig vor. Bei niedrigen Temperaturen an der Erdoberfläche können Gesteine nämlich ein relativ hohes Sauerstoffisotopenverhältnis annehmen, wenn sie chemisch mit Regen oder Meerwasser interagieren. Gelangen sie dann ins Erdinnere und schmelzen dort, entsteht Magma mit demselben hohen Delta-Wert. Und den übernehmen auch die Minerale, die daraus kristallisieren. Demnach sind ein wässriges Milieu und niedrige Temperaturen an der Erdoberfläche erforderlich, damit Magmen mit hohem $\delta^{18}O$-Wert entstehen, aus denen sich entsprechende Zirkone bilden. Kein anderer bekannter Prozess macht dies möglich.

Die hohen Sauerstoffisotopenverhältnisse in den Zirkonen von den Jack Hills deuteten also auf ein wässriges Milieu an der Erdoberfläche hin – wahrscheinlich regelrechte Ozeane. Diese hätten in diesem Fall aber mindestens schon 400 Millionen Jahre vor Ablagerung der ältesten bekannten Sedimentgesteine bei Isua in Grönland existiert. Die Bedingungen auf der frühen Erde sollten demnach mehr denen in einer Sauna als auf einem glühenden Feuerball entsprochen haben.

Konnten wir aus ein paar winzigen Kristallen wirklich derart weit reichende Schlüsse ziehen? Wir warteten mehr als ein Jahr mit der Veröffentlichung unserer Ergebnisse, in dem wir unsere Analysen wiederholten und intensiv nach alternativen Erklärungen suchten. Derweil führten andere Teams ihre eigenen Forschungen in den Jack Hills durch. Steven Mojzsis von der Universität von Colorado in Boulder und seine Kollegen von der Universität von Kalifornien in Los Angeles bestätigten unsere Resultate. Und so publizierten wir 2001 endlich in dichter Folge eine Serie wissenschaftlicher Artikel, in denen wir unsere Funde beschrieben.

Als sich die möglichen Konsequenzen der Zirkonbefunde herumsprachen, war die Aufregung groß. Aus der Hitzehölle einer hadeanischen Welt wäre nichts erhalten geblieben, was Geologen untersuchen könnten. Die Zirkone deuteten jedoch auf ein freundlicheres und vertrauteres Milieu. Zugleich wiesen sie einen Weg, dieses Milieu genauer zu ergründen. Wenn die Erdoberfläche schon frühzeitig kühl genug für die Existenz wassergefüllter Ozeane war, könnten uns die Zirkone vielleicht erzählen, ob es auch Kontinente und andere Bestandteile der heutigen Erde gab. Dazu mussten wir nur das Innere einzelner Kristalle genauer betrachteten.

Spurenelemente bezeugen frühe Existenz von Kontinenten

Selbst der kleinste Zirkon enthält Fremdstoffe, die bei seinem Wachstum eingebaut wurden. Solche Einschlüsse können viel darüber aussagen, wo sich der Kristall gebildet hat. Das Gleiche gilt für das Wachstumsmuster und den Gehalt an Spurenelementen. Peck und ich stellten bei der Untersuchung des 4,4 Milliarden Jahre alten Zirkons beispielsweise fest, dass er Teile anderer Minerale enthielt, darunter Quarz. Dies war eine Überraschung, denn Quarz ist in Urgesteinen selten und kam in der frühesten Erstarrungskruste unseres Planeten wahrscheinlich gar nicht vor. Gewöhnlich findet er sich in Granit, einem typischen Bestandteil älterer, »gereifter« kontinentaler Kruste.

Wenn die Zirkone von den Jack Hills aus granitischem Gestein stammen, würde das die Hypothese stützen, dass sie Überreste vom ersten Kontinent der Erde darstellen. Doch Vorsicht scheint ▷

Was Zirkone erzählen

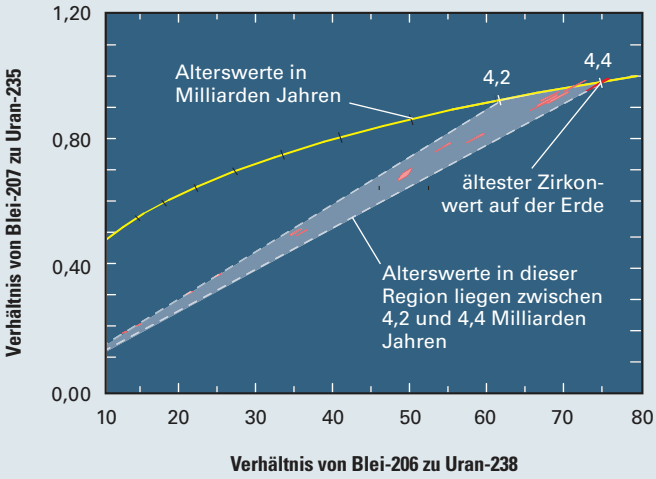
Zirkone von den Jack Hills in Westaustralien zeichnen ein neues Bild der frühen Erde. Es handelt sich um die ältesten bekannten irdischen Festkörper: Einige hundert unter den bisher entdeckten Exemplaren sind vor mehr als vier Milliarden Jahren entstanden. Viele dieser winzigen Zeitkapseln enthalten deutliche physikalische und chemische Hinweise, dass es auf der Erdoberfläche zu einer Zeit, wo diese nach früherer Lehrmeinung glutflüssig gewesen sein soll, wasserhaltige Ozeane und möglicherweise sogar Kontinente gab.

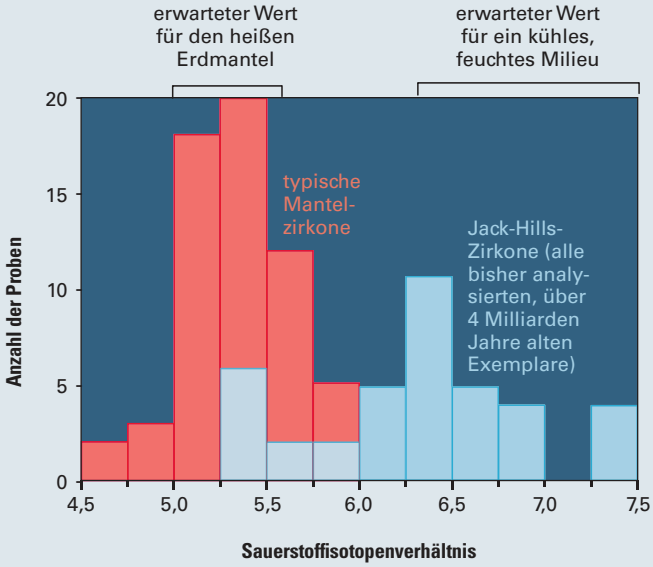
Hohes Alter

Das höchste Alter von 4,4 Milliarden Jahren (rot) für einen Zirkon von den Jack Hills ergab sich als perfekte Übereinstimmung zwischen den Anzeigen zweier unabhängiger Zeitmesser. Die Isotopenpaare Uran-235/Blei-207 (vertikale Achse) und Uran-238/Blei-206 (horizontale Achse) bilden zwei Radiozerfallsuhren, die zu ticken anfangen, sobald sich ein Zirkon gebildet hat. Wenn keine äußeren Störungen auftreten, bewegen sich die beiden Isotopenverhältnisse im Laufe der Zeit entlang einer theoretischen Kurve (gelb). Daten von anderen Teilen desselben Kristalls wichen von dieser Kurve ab, weil hier etwas Blei verloren gegangen war. Der dadurch verursachte Fehler ließ sich jedoch korrigieren.

Kühle Meere

Die Sauerstoffisotopenverhältnisse in Zirkonen von den Jack Hills erreichen Werte bis 7,5. Das ist nur möglich, wenn sich ihr Muttergestein in einem relativ kühlen, wässrigen Milieu nahe der Erdoberfläche gebildet hat. Hätten zur Zeit der Entstehung dieser Minerale Ozeane aus Magma den Globus bedeckt, wären Werte um 5,3 zu erwarten – wie bei allen Kristallen aus heißem Gestein, das aus dem tiefen Erdinnern stammt.





LUCY READING-IKKANDA, LINKS NACH: SIMON A. WILDE, CURTIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY; RECHTS NACH: JOHN W. VALLEY

▷ angebracht. Quarz kann sich nämlich manchmal auch dann in den letzten Stadien der Kristallisation von Magma bilden, wenn dessen Muttergestein nicht granitisch ist. So wurden Zirkone und ein paar Quarzkörner auf dem Mond gefunden, der niemals eine kontinentale Kruste besaß. Einige Wissenschaftler fragten sich folglich, ob die ältesten irdischen Zirkone eventuell in einem ähnlichen Milieu entstanden seien, wie es auf dem jungen Mond herrschte – oder unter irgendwelchen anderen heute nicht mehr gegebenen Umständen, die vielleicht mit gewaltigen Meteoriteneinschlägen zusammenhingen oder mit Vulkanismus, der tief im Erdinnern entsprang. Niemand fand bisher allerdings überzeugende Indizien dafür.

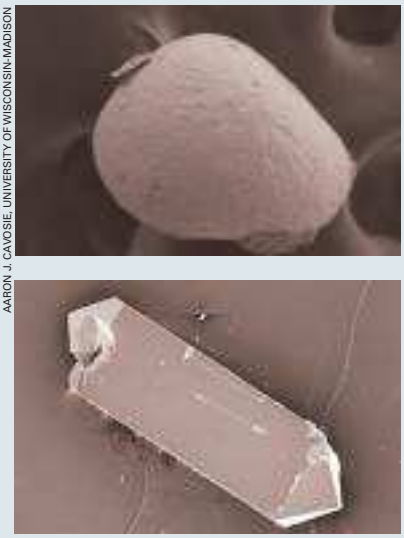
Stattdessen lieferte die Untersuchung der Verunreinigungen in den Zirkonen von den Jack Hills weitere Hinweise auf die Existenz kontinentaler Kruste. Dazu zählten insbesondere erhöhte Konzentrationen von Spurenelementen, deren Gehalt weniger als ein Prozent beträgt, und bestimmte Häufigkeitsmuster von Europium und Cer, wie sie üblicherweise bei der Kristallisation von Krustengestein auftreten.

Die Zirkone bildeten sich demnach eher in der Nähe der Erdoberfläche als im Mantel. Außerdem deuten die Anteile der durch radioaktiven Zerfall entstandenen Isotope von Neodym und Hafnium – zwei Elementen, mit denen Geologen Vorgänge im Zuge der Bildung kontinentaler Kruste datieren – darauf hin, dass schon vor 4,4 Milliarden Jahren bedeutende Mengen solcher Kruste existierten.

Auch die regionale Verteilung der Zirkone spricht dafür. So machen die über vier Milliarden Jahre alten Exemplare in einigen Proben aus den Jack Hills mehr als zehn Prozent aus. Außerdem sind ihre Oberflächen stark abgeschliffen und die ursprünglich eckigen Kristalle gerundet.

Vom Winde verweht

Demnach hat der Wind sie als Staubkörner weit von ihrem Ursprungsort fortgeweht. Wie aber konnten diese Zirkone über Hunderte oder Tausende von Kilometern verfrachtet werden und immer noch gehäuft beieinander liegen, wenn



AARON J. CAVOSIE, UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON

Die abgerundete Form einiger Zirkone von den Jack Hills beweist, dass Wind oder vielleicht auch fließendes Wasser diese Kristalle über weite Strecken – womöglich über eine große kontinentale Landmasse hinweg – transportiert hat, bevor sie endgültig abgelagert wurden (oben). In der Nähe ihres Herkunftsgebiets gefundene Zirkone haben dagegen die ursprünglich vorhandenen scharfen Kanten und ebenen Kristallflächen bewahrt (unten). Die große Zahl uralter, abgerundeter Jack-Hills-Zirkone legt nahe, dass deren Muttergestein weit verbreitet war. Die beiden Aufnahmen entstanden unter einem Rasterelektronenmikroskop.

es nicht sehr viele von ihnen gab? Und wieso sind sie nicht wieder in dem heißen Mantel versunken und dort geschmolzen, wenn nicht eine dicke, weiträumige Kruste vom kontinentalen Typ sie davor bewahrte?

Offenbar waren die Zirkone also einst sehr zahlreich und bildeten sich in einer ausgedehnten Gesteinsschicht, möglicherweise einer kontinentalen Landmasse. In diesem Fall könnten durchaus noch Gesteine aus dieser sehr frühen Zeit existieren – ein faszinierender Gedanke, wenn man bedenkt, wie viel sich von ihnen lernen ließe.

Überdies ist auch die Altersverteilung der Zirkone ungleichmäßig. Sie stammen gehäuft aus ganz bestimmten Zeitabschnitten, während sich in anderen Epochen überhaupt keine Vertreter finden. Mein früherer Doktorand Aaron J. Cavosie, der inzwischen an der Universität von Puerto Rico in Mayagüez lehrt und forscht, entdeckte eine derart ungleiche Verteilung der Entstehungszeiten sogar innerhalb einzelner Zirkone. Darin hatte sich der Kern sehr früh gebildet – vor etwa vor 4,3 Milliarden Jahren –, während die äußere Schale wesentlich später gewachsen war – vor 3,7 bis 3,3 Milliarden Jahren.

Dass sich die Zirkonkristalle vom Kern zum Rand verjüngen, ist keineswegs ungewöhnlich. Schließlich wachsen sie konzentrisch durch Anlagerung an ihrer Oberfläche. Doch der große Altersunterschied zwischen Kern und Randschicht bei diesen speziellen Zirkonen mit einer großen Zeitlücke dazwischen lässt auf zwei Entstehungsphasen schließen, die durch eine längeres Intervall getrennt waren.

In jüngeren Zirkonen, die wesentlich häufiger sind, beruht ein derartiger Altersprung vom Kern zum Rand auf tektonischen Vorgängen. Er tritt dann auf, wenn kontinentale Kruste aufgeschmolzen wird, die Zirkone darin aber intakt bleiben und später weiterwachsen. Denkbar wäre, dass Ähnliches auch für die Bildung der alten Zirkone von den Jack Hills gilt.

Granitisches Muttergestein

Erst vor ganz Kurzem haben Bruce Watson vom Rensselaer Polytechnic Institute in Troy (New York) und Mark Harrison von der Australischen Nationaluniversität über unerwartet niedrige Titangehalte in diesen frühen Kristallen berichtet. Demnach waren deren Ursprungsmagmen zwischen 800 und 650 Grad Celsius heiß. Derart niedrige Schmelztemperaturen aber haben praktisch nur granitische Muttergesteine.

Seit meine Kollegen und ich vor sieben Jahren die Sauerstoffisotopenverhältnisse in den fünf Zirkonen von den Jack Hills analysierten, hat sich das Datenmaterial, das unsere Schlussfolgerungen stützt, rasch vermehrt. Forscher in Perth, Canberra, Peking, Los Angeles, Edinburgh, Stockholm und Nancy haben mittlerweile Zehntausende von Zirkonen von den Jack Hills mit Ionenmikrosonden untersucht, um die wenigen aufzuspüren, die mehr als vier Milliarden Jahre alt sind. Auch andere Datierungsmethoden wurden angewandt.

Mittlerweile sind auf diese Weise von verschiedenen Fundorten insgesamt einige hundert Zirkone zusammengekommen, die zwischen 4,4 und 4 Milliarden Jahre zählen. David R. Nelson und seine Kollegen vom Westaustralischen Geologischen Dienst haben selbst noch 300 Kilometer südlich der Jack Hills einige Exemplare gefunden. Derweil durchkämmen Geochemiker andere sehr alte Erdregionen in der Hoffnung, die ersten Zirkone außerhalb Australiens zu entdecken, die es auf mehr als 4,1 Milliarden Jahre bringen.

Dabei profitieren sie auch von verfeinerten Messmethoden. Cavosie hat Möglichkeiten gefunden, die Genauigkeit der Analyse deutlich zu verbessern. Bei seinen Untersuchungen konnte er in über zwanzig Zirkonen von den Jack Hills hohe Sauerstoffisotopenverhältnisse nachweisen – Indizien für niedrige Oberflächentemperaturen und frühe Ozeane schon vor 4,2 Milliarden Jahren. Meine Kollegen und ich können die Suche nun mit dem ersten Modell der neuesten Generation von Ionenmikrosonden fortsetzen, das CAMECA IMS-1280 heißt und im März 2005 in meinem Labor installiert wurde.

Viele unserer Fragen werden sich beantworten lassen, sobald wir es schaffen, Teile des Originalgesteins aufzuspüren, in dem sich die Zirkone einst gebildet haben. Aber auch wenn das nicht gelingen sollte, haben uns die kleinen Zeitkapseln ganz sicher noch eine Menge zu erzählen. ◁

John W. Valley hat 1980 an der Universität von Michigan in Ann Arbor promoviert, wo er sein Interesse für die frühe Erde entdeckte. Gemeinsam mit seinen Studenten hat er seither die geologischen Zeugnisse uralter Gesteine in Nordamerika, Westaustralien, Grönland und Schottland untersucht. Derzeit ist er Präsident der Amerikanischen Mineralogischen Gesellschaft und Van-Hise-Professor für Geologie an der Universität von Wisconsin in Madison.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Magmatic ^{18}O in 4400–3900 Ma detrital zircons: a record of the alteration and recycling of crust in the early Archean. Von Aaron J. Cavosie et al. in: Earth and Planetary Science Letters, Bd. 235, S. 663, 15. 7. 2005

A cool early earth. Von John W. Valley et al. in: Geology, Bd. 30, S. 351, April 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Mathematikgenies an der Wümme

Auf dem platten Land gedeiht ein schulübergreifendes Projekt zur Hochbegabtenförderung.

wis
wissenschaft in die schulen!

Wollen Sie Ihren Schülern einen Anreiz zu intensiver Beschäftigung mit der Wissenschaft geben? »Wissenschaft in die Schulen!« bietet teilnehmenden Klassen einen Klassensatz **»Spektrum der Wissenschaft«** oder **»Sterne und Weltraum«** kostenlos für ein Jahr, dazu didaktisches Material und weitere Anregungen.
www.wissenschaft-schulen.de

Von Stephanie Wichtmann

Eigentlich gehört das Ratsgymnasium in Rotenburg an der Wümme um 16 Uhr dem Reinigungspersonal. Aber jeden Montag fahren zahlreiche Eltern ihre Kinder vor: Die Siebtklässlerin Rieka kommt aus dem 30 Kilometer entfernten Walsrode, Sahand und Eike werden aus Oyten (25 Kilometer) gebracht, andere Schüler kommen aus weiteren umliegenden Orten. Öffentliche Verkehrsmittel stehen praktisch nicht zur Verfügung; einige ältere Schüler haben schon selbst einen Führerschein, und nur wenige Glückspilze wohnen in Fahrradentfernung.

Was motiviert diesen intensiven Autoverkehr auf dem platten Land? Es ist die schulübergreifende Arbeitsgemeinschaft »Talentförderung Mathematik«. Es geht darum, zweieinhalb Stunden lang interessante mathematische Probleme jenseits der Schulmathematik zu lösen. Man trifft sich, getrennt nach Altersgruppen, alle zwei Wochen; am einen Montag sind die Siebtklässler und die »Großen« (Klassenstufe 10 bis 13) an der Reihe, am anderen Montag die Kinder aus den Klassen 8 und 9. Die Anleitung übernehmen ältere Teilnehmer unserer Arbeitsgemeinschaft, die in der Regel einen Mathe-Leistungskurs besuchen, Studenten der International University of Bremen oder Lehrer.

Heutiges Thema ist bei den Siebtklässlern das Kästchenspiel (Kasten rechts oben). Die Älteren befassen sich mit Aufgaben aus vergangenen Runden des Bundeswettbewerbs Mathematik. Fabian, der am Gymnasium Soltau einen Leistungskurs besucht, erläutert den anderen Kursteilnehmern die Geometrie-Aufgabe der 2. Runde von 2005; vor wenigen Wochen ist er selbst Bundessieger geworden.

Spiel, Satz und Beweis

Auf den Sitzungen werden anregende Fragestellungen behandelt, die überwiegend aus Bereichen jenseits der Mathematik-Lehrpläne stammen. Dazu zählen insbesondere Spieltheorie, Graphentheorie, Topologie, Logik, Zahlentheorie und Informatik. Die teilnehmenden Schülerinnen und Schüler sollen langsam an mathematische Denk- und Ar-

Talentförderung Mathematik

Die schulübergreifende Arbeitsgemeinschaft dieses Namens trifft sich an drei Standorten im Bezirk Lüneburg: Neu Wulmstorf, Lüneburg und Rotenburg/Wümme. Insgesamt werden zurzeit etwa 140 Schüler der Klassenstufen 7 bis 13 gefördert.
Kontakt: Stephanie Wichtmann
Hermann-Hesse-Straße 3
27356 Rotenburg
Telefon 04261 98856
www.talentfoerderung-mathematik.de

Der nächste Test zur Talentsuche für Sechstklässler findet am 24. Juni an der Universität Hamburg statt; es ist bereits der 24. Test dieser Art. Mathematiktalentierte Schülerinnen und Schüler aus Hamburg und dem Bezirk Lüneburg können sich dazu bis zum 10. Mai anmelden und Vorbereitungsunterlagen anfordern:
William-Stern-Gesellschaft
Verein für Begabungsforschung und -förderung
Universität Hamburg
Psychologisches Institut II
Von-Melle-Park 5
20146 Hamburg

In Hamburg findet seit 1999 unter dem Namen »Projekt PriMa« auch eine intensive Grundschulförderung im mathematischen Bereich statt.

Informationen unter
www.li-hamburg.de/fortbildung/bf.1200/bf.1210/bf.1210.Primarstufe/ list.infos/one.infos/?entry=page.info.bf.1210.Primarstufe.e.2

In der Hamburger William-Stern-Gesellschaft ist Karl Kießwetter noch immer aktiv.
www.kinderakademie-hamburg.de

Es gibt eine Fülle von Aktionsmöglichkeiten, die mathematikbegeisterten Jugendlichen unabhängig vom Wohnort offen stehen. Eine Sammlung finden Sie unter **www.spektrum.de** im Online-Inhaltsverzeichnis dieses Hefts.

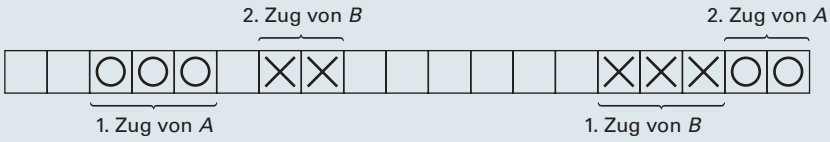
Das Kästchenspiel

Das Spielfeld besteht aus *n* in einer Reihe liegenden Kästchen. Im unten stehenden Beispiel ist $n = 19$.

Die Spieler *A* und *B* ziehen abwechselnd. Wer am Zug ist, besetzt zwei oder drei nebeneinander liegende, bisher unbesetzte Felder, das heißt, er markiert sie mit einem Zeichen (O für *A*, X für *B*). Gewonnen hat, wer als Letzter ziehen kann.

Wie kann man bei diesem Spiel gewinnen? Durch schlichtes Probieren kommt man – als Siebtklässler oder Erwachsener – nicht weit. Der Geheimtipp ist: zuerst die Situation auf einem absurd kleinen Spielfeld (zum Beispiel $n = 5$) studieren.

Die Lösung des Problems sei hier verraten. Der erste Spieler *A* hat eine Gewinnstrategie. Er setzt im ersten Zug zwei oder drei Kästchen in die Mitte, sodass zwei gleich große Teilspielfelder entstehen, und macht fortan alles, was *B* in einem Teilfeld tut, im darauffolgenden Zug im anderen Teilfeld nach.



ZEICHNUNGEN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: STEPHANIE WICHTMANN

beitsweisen gewöhnt werden und beim Problemlösen ihre Freiheiten ausleben können.

Auf Letzteres legen wir großen Wert. Manch einer zieht es vor, allein zu arbeiten, andere knobeln lieber gemeinsam, manch einer hasst es, Gedanken übersichtlich zu Papier zu bringen, andere wiederum können sehr gut strukturieren. Es ist erwünscht, dass jeder von den Fähigkeiten der anderen profitiert und möglichst auch etwas dazulernt. Im Gegensatz zum Schulunterricht soll aber kein Gefühl des Zwangs entstehen. Diese eher lockere Atmosphäre regt nach unserer Erfahrung die Kreativität der Schülerinnen und Schüler sehr an.

Die Motivation für ein Thema kommt in der Regel von einem »auslösenden Problem«, nicht selten in Form einer Geschichte oder durch anregendes Material. Die Schülerinnen und Schüler werden dann aufgefordert, sich in eine kleine, altersangemessene Forschungssituation zu begeben. Mit Gleichgesinnten können sie lernen, gemeinsam Lösungsstrategien zu entwickeln, kreativ zu sein, sich Arbeit aufzuteilen, Repräsentationsebenen zu wechseln, auch andere Lösungswege als richtig anzuerkennen, sich gegenseitig ihre Ideen zu erklären, sie verständlich und auch mathematisch korrekt aufzuschreiben. Mathematik besteht eben nicht nur im Lösen von Aufgaben (und schon gar nicht im Anwenden auswendig gelernter Formeln); das Auffinden und Erfassen von – zu beweisenden – Zusammenhängen gehört ebenso dazu (Kasten S. 84).

Jedes Jahr gibt es eine Mathe-Ferienfahrt für alle Regionalgruppen, an der etwa 70 Personen aus allen Jahrgängen teilnehmen. Auch externe Teilnehmer sind willkommen.

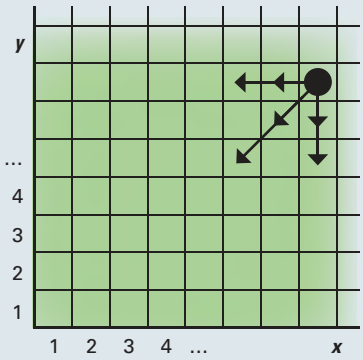
Unsere Arbeitsgemeinschaft steht in der Tradition des »Hamburger Modells zur Identifizierung und Förderung mathematisch besonders befähigter Schülerinnen und Schüler«, das Anfang der 1980er Jahre von Karl Kießwetter, Professor für Didaktik der Mathematik in ▷

Siebtklässler erfahren den Euler'schen Polyedersatz an konkreten Beispielen.

ALLE FOTOS DIESES ARTIKELS: STEPHANIE WICHTMANN

Das Ein-Stein-Spiel

Auf einem (beliebig großen) Schachbrett liegt ein einziger Stein (daher der Name des Spiels). Die beiden Spieler *A* und *B* dürfen abwechselnd diesen Stein um ein oder zwei Felder nach links, nach unten oder diagonal nach links unten bewegen. Wer den letzten Zug machen kann – der auf dem linken unteren Eckfeld endet –, hat gewonnen.



Wie findet man eine Gewinnstrategie? Wieder, indem man die einfachsten Spiele zuerst ausprobiert, das sind die, bei denen der Stein anfangs schon nahe der linken unteren Ecke steht.

Die Neuntklässler markieren die Felder, von denen aus *A* eine Gewinnstrategie hat, mit einem weißen Go-Stein und diejenigen, von denen aus *B* gewinnt, mit einem schwarzen (oberes Bild). Ein Feld, von dem aus *A* so ziehen kann, dass *B* unweigerlich auf ein weißes Feld gehen muss, kann man ebenfalls mit einem weißen Stein belegen. So arbeitet man sich durch das Spielbrett hindurch, bis man Muster erkennt.

Die Kinder suchen dann eine Formel, die das gefundene Muster beschreibt. Damit können sie eine Aussage über Gewinnpositionen und -strategien formulieren und beweisen.

Varianten des Spiels können mit denselben Mitteln analysiert werden. Das Bild unten zeigt die Gewinnpositionen für den Fall, dass man bei ansonsten gleichen Spielregeln nicht ein oder zwei, sondern zwei oder drei Felder weit ziehen darf.

▷ Hamburg, ins Leben gerufen wurde (siehe dessen Beitrag in Spektrum der Wissenschaft 5/1984, S. 17). Schon 1984 entstand parallel zu dem Hamburger Unternehmen eine Regionalgruppe in Neu Wulmstorf, an der ich selbst, damals noch Schülerin, mitwirkte.

Unser Vorbild war ein Projekt der Johns Hopkins University in Baltimore (Maryland). Dort werden Kurse für »Geeignete« jeder Jahrgangsstufe angeboten, die den Schulstoff mehrerer Jahre in wenigen Wochen vermitteln. Damit können die Teilnehmer ihren Schulabschluss zumindest in diesem Fach vorverlegen.

Diese »Acceleration« ist mit dem deutschen Schulsystem bislang nicht vereinbar. Hochbegabte, die ihr persönliches Lerntempo erhöhen und vor allem die quälende Langeweile im Standardunterricht vermeiden wollen, können allenfalls

- sich vorzeitig einschulen lassen,
- Klassen überspringen,
- quasi nebenher am Unterricht in höheren Klassen oder Vorlesungen an der Universität teilnehmen oder
- eine Spezialschule besuchen.

»Enrichment« (vertieftes Lernen) lässt sich hingegen in unserem Schulsystem in vielfältiger Art und Weise verwirklichen.

Die Identifizierung unserer Hochbegabten findet in Form von zwei Tests an der Universität Hamburg statt, an denen man am Ende der 6. Klasse teilnehmen kann (Kasten S. 82). Es handelt sich um

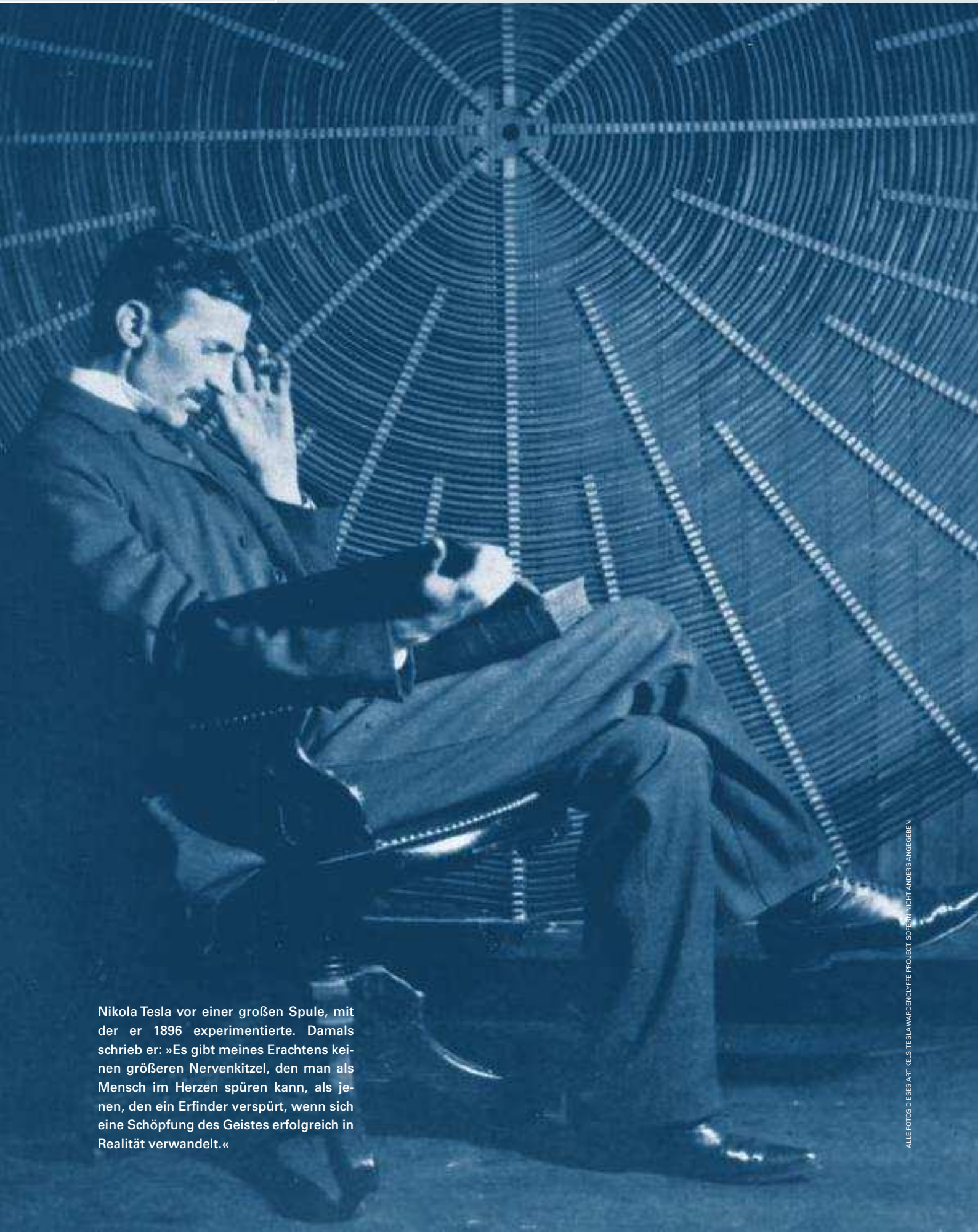
- den SAT-M (Scholastic Aptitude Test Mathematics), der eigentlich als College-Eingangstest für Sechzehnjährige dient, sowie um
- den HTMB (Hamburger Test für mathematische Begabung), den Karl Kießwetter bereits in den 1980er Jahren entwickelt hat.

Durch die Auswertung der Tests können wir eine gute Prognose für eine erfolgreiche Projektteilnahme abgeben. Je nach Anzahl der Testteilnehmer wird eine Mindestpunktzahl als Eingangskriterium festgelegt.

Seit 1984 haben in Niedersachsen ungefähr 630 Schülerinnen und Schüler, darunter etwa ein Drittel Mädchen, an unseren Talentfördergruppen teilgenommen. Immerhin die Hälfte der Teilnehmer ist mindestens vier Jahre lang ihrer Gruppe treu geblieben. Zu vielen Ehemaligen haben wir noch weit über ihr Abitur hinaus Kontakt, nicht selten haben sie auch Mathematik studiert. ◁

Stephanie Wichtmann ist Mathematik- und Sportlehrerin am Domgymnasium in Verden/Aller. Sie leitet seit 22 Jahren Gruppen in der Talentförderung Mathematik in Hamburg und Niedersachsen, hat als Schulbuchautorin beim Gymnasialwerk MatheNetz des Westermann-Verlags mitgearbeitet und ist Fachberaterin für Hochbegabung im Bezirk Lüneburg und in der Lehrerfortbildung.

AUTORIN



Nikola Tesla vor einer großen Spule, mit der er 1896 experimentierte. Damals schrieb er: »Es gibt meines Erachtens keinen größeren Nervenkitzel, den man als Mensch im Herzen spüren kann, als jenen, den ein Erfinder verspürt, wenn sich eine Schöpfung des Geistes erfolgreich in Realität verwandelt.«

ALLE FOTOS DIESES ARTIKELS: TESLA WARDENCLYFFE PROJECT, SOFERN NICHT ANDERS ANGEGEBEN

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Ein fantastischer Erfinder

Nikola Tesla machte mit seinen Erfindungen den Wechselstrom nutzbar. Doch immer wieder scheiterte er daran, seine oft skurrilen Ideen zu verwirklichen.

Von W. Bernard Carlson

Als sich die Mitglieder des ehrenwerten Chicago Commercial Club am 13. Mai 1899 für einen Vortrag von Nikola Tesla versammelten, überraschte sie ein Wassertank in der Mitte des Hörsaals. Darauf schwamm ein zwei Meter langes Holzboot.

Das Publikum wusste bereits, dass Tesla ein bedeutender Ingenieur war, dessen Erfindungen wesentlich zur Entwicklung des amerikanischen Stromnetzes beigetragen hatten. Auch war er für sein Showtalent bekannt: 1893 hatte der Serbe auf der Weltausstellung in Chicago die Zuschauer verblüfft und Stromstöße mit einer Spannung von 250 000 Volt durch seinen Körper geschickt. Was würde Tesla an diesem Abend mit dem Boot anstellen?

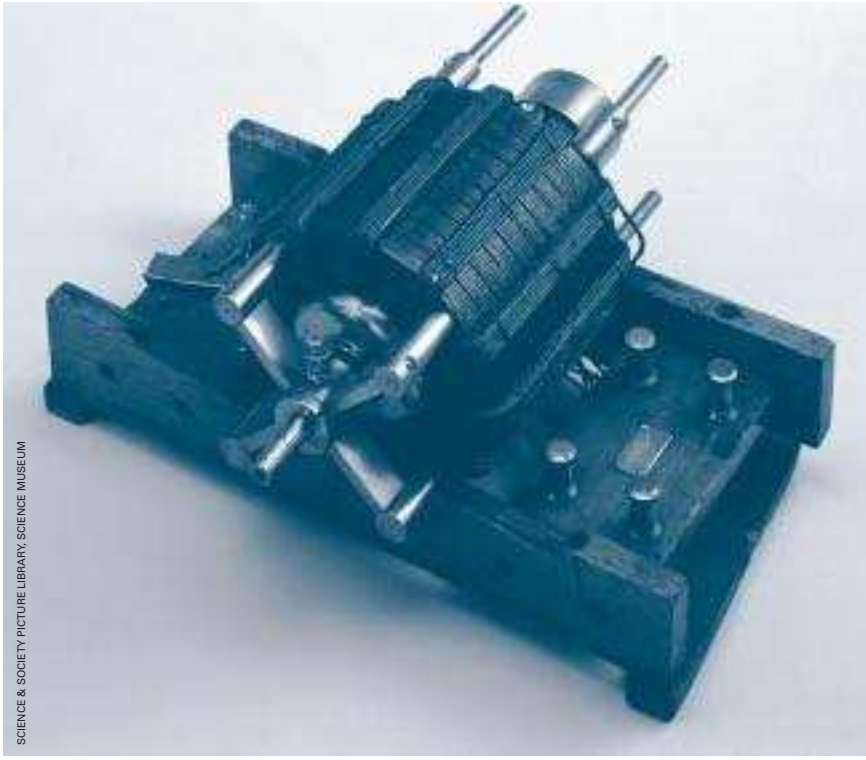
Als das Publikum Platz genommen hatte, betrat Tesla den Raum, schritt zum Tank und begann wortlos, ein Gerät zu bedienen. Wie von Geisterhand gesteuert bewegte sich das Boot. Dann forderte der Erfinder seine Zuschauer auf zu bestimmen, ob das Boot nach links oder rechts fahren solle – und das Boot gehorchte.

Tesla hatte eine Fernbedienung erfunden. Dass dies kein Spielzeug war, erklärte er anschließend seinem Publikum. Ein halbes Jahr zuvor war der spanisch-amerikanische Krieg zu Ende gegangen, und so waren viele Zuhörer von Teslas Vorschlag beeindruckt, man könne ferngesteuerte Schiffe hinter die feindlichen Linien bringen ohne eigene Verluste zu erleiden.

Trotz dieser eindrucksvollen Demonstration setzte Tesla seine Technik nie für militärische Zwecke ein. Er war nicht nur ein entschiedener Kriegsgegner, sondern vor allem auch wenig geschickt darin, seine zahlreichen Erfindungen langfristig in wirtschaftlich erfolgreiche Produkte umzuwandeln.

Geboren wurde Nikola Tesla am 10. Juli 1856. Als Kind serbischer Eltern wuchs er an der Grenze des österreichisch-ungarischen Kaiserreichs in einer Gegend auf, die heute zu Kroatien gehört. Von 1876 bis 1878 studierte er Ingenieurwesen an der Technischen Hochschule im österreichischen Graz.

Während einer Vorlesung über Experimentalphysik dachte Tesla erstmals über den Wechselstrommotor nach. Damals waren Elektromotoren verbreitet, die mit Gleichstrom betrieben wurden. Sie bestanden aus einem äußeren, unbeweglichen Stator und dem inneren, drehbar gelagerten Rotor, der die mechanische Arbeit leistete. Bei kleineren Motoren war als Stator ein Permanentmagnet üblich, bei größeren Motoren ein Elektromagnet. Der Rotor war üblicherweise ein Metallkern mit Drahtumwicklung, die als Spule wirkte. Um die Drehung des Motors aufrechtzuerhalten, wechselte die Polung des Rotors zweimal pro Umdrehung. Dazu dienten »Bürstenkommutatoren«, elektrische Kontakte aus Kupferdraht. Doch wenn diese die Kabel der Stromzufuhr berührten, führte das häufig zum Funkenschlag. ▷



SCIENCE & SOCIETY PICTURE LIBRARY, SCIENCE MUSEUM

In den Jahren 1887 und 1888 baute Tesla in seinem Labor in New York den ersten Zweiphasen-Wechselstrommotor. Wie bereits existierende Motoren bestand dieser aus einem festen Stator und einem darin befindlichen, drehbaren Rotor. Tesla leitete jedoch durch Induktionsspulen an gegenüberliegenden Seiten des Stators Wechselströme, deren Phasen gegeneinander verschoben waren. Dadurch gelang es ihm, ein im Stator rotierendes Magnetfeld zu erzeugen. Dieses induzierte im Rotor ein entgegengesetztes elektrisches Feld, wodurch sich dieser zu drehen begann.

Die »Stadt des Lichts« auf der Weltausstellung in Chicago (1893) wurde von Wechselstromgeneratoren versorgt, die eine Leistung von 9 Megawatt hatten und auf Teslas Entwicklung beruhten.

Eines Tages erlebte Tesla, wie der Physikprofessor Jakob Pöschl in seiner Vorlesung versuchte, diesen gefährlichen Effekt unter Kontrolle zu bekommen. Tesla schlug vor, man solle besser einen Motor entwickeln, der ohne Kommutator auskäme. Pöschl hielt das für unmöglich und empfand diesen Rat als Provokation. Er antwortete: »Herr Tesla mag große Dinge erreichen, aber gewiss wird er nie diesen Motor entwickeln.« Dieser Rüffel spornte den jungen Mann an.

Nachdem Tesla sein Studium abgebrochen hatte, reiste er 1881 nach Budapest. Er hoffte, bei Tivadar und Ferenc Puskas arbeiten zu können, einem mit Teslas Familie befreundetem Bruderpaar. Tivadar war es kurz zuvor gelungen, Thomas A. Edison die Rechte für die Verwertung seiner Erfindungen in Europa abzuringen. Die Brüder wollten in Budapest eine Telefonvermittlung aufbauen und dafür Edisons Konzept nutzen. Ihr Geld reichte jedoch nicht, um Tesla sofort einzustellen.

Rotierendes Magnetfeld

Eines Tages kam ihm bei einem Spaziergang mit seinem Freund Antal Szigeti ein Geistesblitz. Beim Blick in den Sonnenuntergang stellte sich Tesla ein rotierendes Magnetfeld im Stator eines Elektromotors vor. Ihm war klar, dass es auf Grund der gegenseitigen Anziehung eine Drehung des Rotors in Gang setzen kann – ohne dass ein Kommutator benötigt würde. Doch wie sollte er das rotierende Magnetfeld zu Wege bringen?

Tesla wusste, dass ihm noch das praktische Wissen fehlte, um diesen Motor zu entwickeln. Nachdem er den Brüdern Puskas geholfen hatte, die Budapester Telefonvermittlung aufzubauen, begleitete er Tivadar nach Paris. Im Auftrag der Société Electrique Edison installierten sie dort eine elektrische Beleuchtungsanlage. Im Jahr 1884 wechselte Tesla zu Edison Machine Works nach New York. Bei einer der wenigen Begegnungen mit dem berühmten Erfinder verriet Tesla beinahe seine Idee. Später erinnerte er sich: »Es war auf Coney Island, und gerade als ich ansetzte, sie ihm zu erklären, trafen wir jemanden, der Edison die Hand schüttelte. Als ich an diesem Abend heimkam, hatte ich Fieber und war fest entschlossen, nicht mit anderen Menschen über (meinen Motor) zu sprechen.«

Teslas Aufgabe bei Edison war es, Dynamos zu verbessern. Falls es ihm gelänge, deren Leistungsfähigkeit um 25 Prozent zu steigern, sollte er eine Prämie von 50 000 US-Dollar erhalten. Doch obwohl er dieses Ziel erreichte, blieb das Geld aus. Empört verließ er Edisons Firma.

In seiner Freizeit hatte Tesla die Bogenlampe erfunden. Deren Licht beruht auf den elektrischen Funken zwischen zwei Elektroden. Benjamin A. Vail und Robert Lane, zwei Investoren aus Rah-

IN KÜRZE

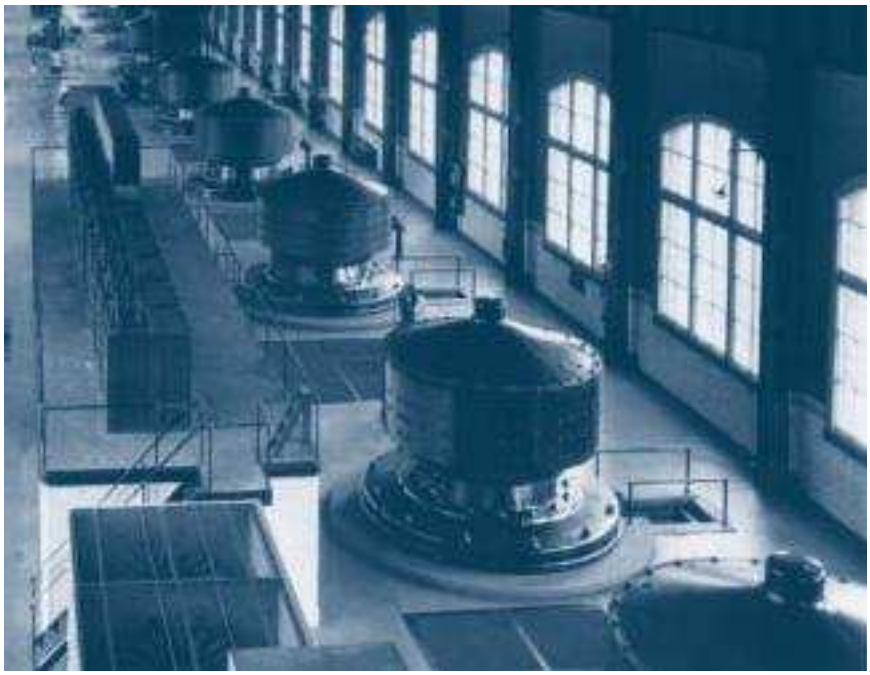
▶ **Nikola Tesla (1856–1943)** war ein serbisch-amerikanischer Ingenieur, der das rotierende Magnetfeld als Grundlage wechselstromgetriebener Maschinen entdeckte. Dazu gehören Wechselstromdynamos, Transformatoren und Motoren. Tesla erfand auch die Tesla-Spule, die in Radios und Röhrenbildschirmen benutzt wird.

▶ Tesla war auf Grund seines **Showtalents bei der Sensationspresse** beliebt. Seine absurden Behauptungen, dass er mit anderen Planeten kommuniziere und einen Todesstrahl entwickelt habe, wurde jedoch viel kritisiert. Zwar gelang es ihm, grundlegende technische Prinzipien in funktionierende Maschinen umzusetzen, doch interessierte er sich kaum dafür, diese zu wirtschaftlich erfolgreichen Produkten weiterzuentwickeln.

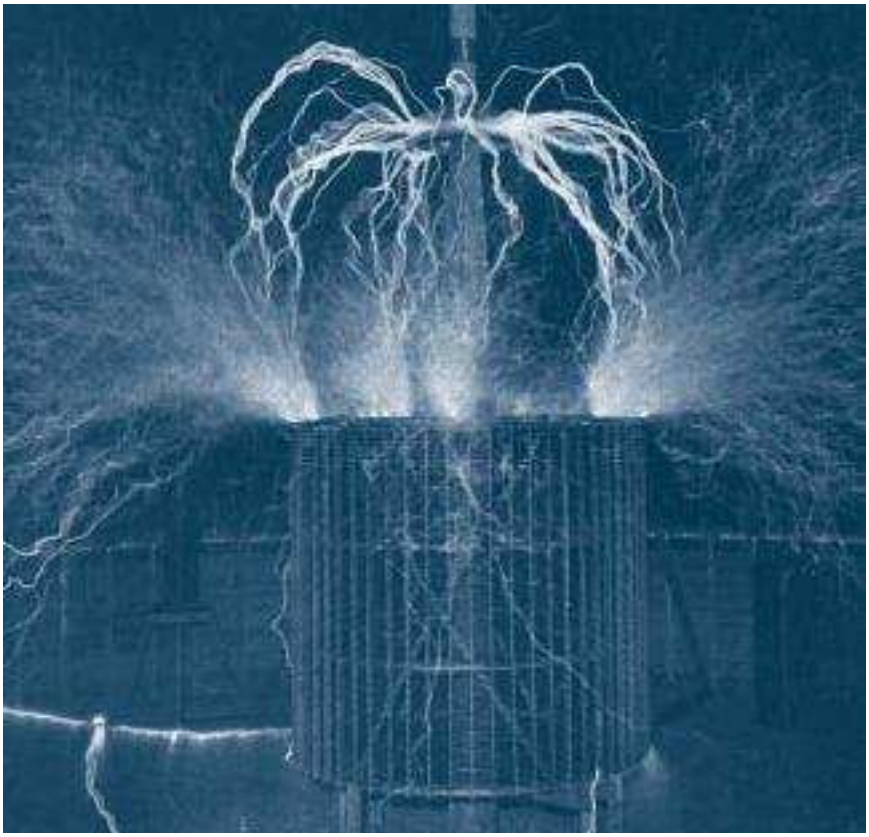
way im US-Bundesstaat New Jersey, ermutigten ihn dazu, diese Lampe patentieren zu lassen. Tesla folgte ihrem Rat und trat das Patent an die beiden Geschäftsleute ab, in dem Glauben, dass sie mit eigenen Produkten gegen Edison konkurrieren wollten. Tatsächlich beabsichtigten Vail und Lane jedoch, ein eigenes Elektrizitätswerk zu betreiben. Nachdem es Tesla gelungen war, in Rahway seine Bogenlampen zu installieren, wurde ihm gekündigt.

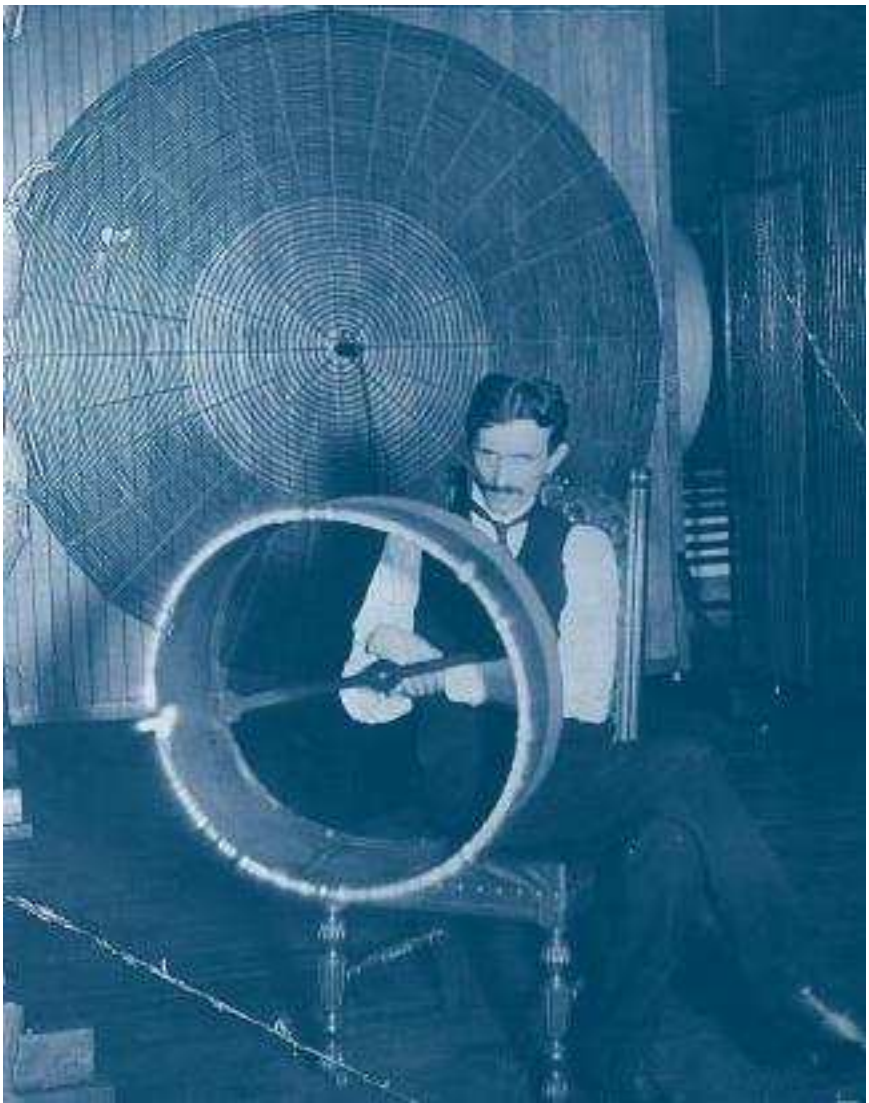
Nun stand er mittellos da und sah sich gezwungen, seinen Lebensunterhalt als Tagelöhner im Straßenbau zu verdienen. Trotz dieser Knochenarbeit schaffte er es, im März 1886 ein Patent für einen thermomagnetischen Motor zu beantragen. Dies war ein neuartiges Gerät, das durch die Erhitzung und Abkühlung von Magneten betrieben wurde. Der Vorarbeiter der Baukolonne, dem Tesla von der Erfindung erzählt hatte, brachte ihn in Kontakt mit Charles F. Peck. Dieser Anwalt war von dem Konzept sofort beeindruckt und bot dem Erfinder an, seine Forschungsarbeiten zu unterstützen. Peck, der in technischen Fragen kein Fachmann war, zog Alfred Brown hinzu, den Direktor der Western Union Telegraph Company. Gemeinsam beschlossen sie, für Tesla in Manhattan ein Labor zu mieten, in dem der Erfinder den Motor entwickeln konnte.

Nachdem sich das Konzept jedoch als nicht praktikabel herausstellte, drängte Peck ihn dazu, sich der Verbesserung von Wechselstrommotoren zu widmen. Tesla dachte wieder an seine Budapester Vision und begann, mit einem Motor zu experimentieren, der mehrere voneinander getrennte Stromkreise enthielt. Im ▷



Hydroelektrische Generatoren, die einen dreiphasigen Wechselstrom erzeugten, wurden 1896 von der Firma Westinghouse an den Niagarafällen im US-Bundesstaat New York installiert. Anfangs wurde der Strom nur in das 36 Kilometer entfernte Buffalo übertragen. Innerhalb weniger Jahre wurde die Stromleitung bis nach New York verlängert. So konnte der Broadway bei Nacht erstmals hell erleuchtet werden.





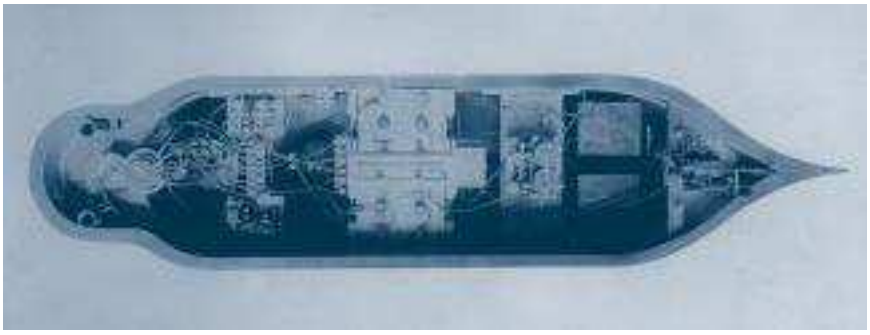
▷ September 1887 entdeckte Tesla, dass ein starkes Magnetfeld entsteht, wenn man zwei getrennte Wechselströme in Spulenpaare einspeist, die sich an gegenüberliegenden Seiten des Stators befinden. Heute nennt man dies einen Zweiphasenmotor, dessen Ströme um 90 Grad phasenverschoben sind. Diese Erfindung stand am Anfang einer außerordentlich kreativen Phase, in deren Verlauf Tesla mehrere Patente beantragte.

Bald fiel dem Erfinder auf, dass es mit einem mehrphasigen Wechselstromnetz möglich sein sollte, elektrische Energie über große Entfernungen zu transportieren. Dabei sind die Verluste deutlich geringer als in Edisons Gleichstromnetz, das nur auf kurzen Entfernungen wirtschaftlich war und sich für wenig mehr als die städtische Beleuchtung mit Glühlampen eignete.

Peck und Brown begriffen, dass sich mehrphasige Wechselstrommotoren profitabel betreiben ließen, und sie mussten nun entscheiden, ob sie diese Geräte in einer eigenen Firma herstellen wollten. Sie beschlossen darauf zu verzichteten und die Patente an den Meistbietenden zu versteigern. Zuvor sollte Tesla am American Institute of Electrical Engineers in New York einen Vortrag über die neue Technik halten. Nachdem er dies im Mai 1888 getan hatte, war das Fachpublikum begeistert. Auch George Westinghouse erfuhr bald davon. Dieser Ingenieur und Industrielle war durch die Fertigung von Bremsen und Signalen für die Eisenbahn und von Schaltanlagen für das Telefonsystem reich geworden und hatte drei Jahre zuvor in Pittsburgh ein Wechselstromnetz installiert. Westinghouse erkannte, dass ein solches Netz erst mit Teslas Motorkonzept einsatzreif war.

Im Juli 1888 boten Peck und Brown eine stattliche Summe für Teslas Patente: 25 000 US-Dollar in bar, 50 000 US-

◁ Im Jahr 1899 experimentierte Tesla in Colorado Springs mit künstlichen Blitzen (oben). Um diese zu erzeugen, benutzte er Drahtspulen, die auf große Rahmen aufgewickelt waren. Das untere Bild aus dem Jahr 1898 zeigt ihn in seinem Labor in New York. Er hält eine Spule, die eine Spannung von einer halben Million Volt induziert.



Tesla beschäftigte sich immer wieder mit ferngesteuerten Booten. Im Jahr 1898 stellte er das Konzept eines zwei Meter langen, ferngesteuerten U-Boots vor. Im folgenden Jahr führte Tesla vor dem Chicago Commercial Club ein Gerät vor, mit der er die Fahrtrichtung und Geschwindigkeit des Boots drahtlos beeinflussen sowie an Bord befindliche elektrische Lichter aufleuchten lassen konnte.

Dollar in Aktienanteilen und 2,50 US-Dollar für jede Pferdestärke eines Motors, der in seiner Fabrik gefertigt würde. Tesla überließ seinen Unterstützern fünf Neuntel des Geldes und behielt vier Neuntel für sich selbst.

Westinghouse wollte mit Teslas Motor eine Straßenbahn antreiben und holte den Erfinder nach Pittsburgh, damit er den Motor an sein Stromnetz anpasste. Dieser Versuch schlug jedoch fehl, weil es nur eine Phase aufwies. Es wäre notwendig gewesen, weitere Leitungen in das Stromnetz einzuziehen. Außerdem war dessen Frequenz von 133 Hertz zu hoch für Teslas Motor, der bei 50 Hertz am besten lief.

Erst sechs Jahre später gelang es, diesen Motor mit einem Wechselstromsystem abzustimmen. Nachdem Westinghouse 1893 auf der Weltausstellung von Chicago mit der »Stadt des Lichts« eine eindrucksvolle Beleuchtungsanlage vorgeführt hatte, die auf der Wechselstromtechnik Teslas beruhte, bekam er den Zuschlag zum Bau eines Wasserkraftwerks an den Niagarafällen. Im Entwurf dieser Anlage wurde Teslas Motor modifiziert und an einem Wechselstromsystem betrieben, das drei Phasen und eine Frequenz von 60 Hertz nutzte. Der Bau des Kraftwerks gelang, und schon 1895 versorgte eine 36 Kilometer lange Leitung die Stadt Buffalo mit Strom. Die von Tesla entworfene Technik wurde zur Grundlage des nordamerikanischen Stromnetzes.

Tesla hatte lange vor der Inbetriebnahme des Kraftwerks die Firma von Westinghouse verlassen. Als er sah, dass seine Technik funktionierte, machte er sich auf die Suche nach neuen Aufgaben. Mit dem Geld aus seinen Lizenzeinnahmen richtete er sich bereits im Jahr 1889 in New York ein neues Labor ein. Um die Öffentlichkeit und neue Investoren für seine Arbeit zu interessieren, begann er damit, das Bild des exzentrischen Genies zu kultivieren. Genau so, wie die Reporter in den 1870er Jahren über Edisons Erfindungen in dessen Labor in Menlo Park bei New York geschrieben hatten, strömten sie nun in den 1890er Jahren zu Tesla, um über seine sensationellen Entdeckungen und dramatischen Behauptungen zu berichten.

Blitze aus der Tesla-Spule

Beim Versuch, ein Bogenlicht für den Einsatz in Wechselstromnetzen zu entwickeln, stieß Tesla auf ein neues, faszinierendes Arbeitsgebiet: die Phänomene der Hochfrequenzelektrizität. Was würde geschehen, wenn man einen Wechselstrommotor mit 10 000 Hertz betrieb anstatt – wie sonst üblich – mit 60 Hertz?

In seinem Motor hatte Tesla bereits Magnetinduktionsspulen miteinander kombiniert, also elektrische und kapazitive Widerstände. Jetzt versuchte er, mit Induktionsspulen und Kondensatoren Hochfrequenzströme zu erzeugen. Längst war bekannt, dass in Stromkreisen mit Spulen und Kondensatoren Resonanzeffekte auftreten: Der elektrische Widerstand hängt also von der Frequenz ab. Mit den später so genannten Tesla-Spulen gelang es dem Erfinder, elektrische Signale zu verstärken und immer höhere Spannungen zu erreichen. Damit konnte er mehr als 40 Meter ▷

▷ lange Blitze erzeugen – ideal für eindrucksvolle Demonstrationen.

Besonders fasziniert war Tesla von der Möglichkeit, mit Hilfe der Resonanz Radiosignale abzustimmen. Ein Sender mit einer bestimmten Kapazität und Induktivität erzeugt Signale einer Frequenz, die von einem Empfänger mit der gleichen Kapazität und Induktivität empfangen werden. Auf diese Weise sollte das Prinzip der elektrischen Resonanz eine neuartige Beleuchtungstechnik, Funkverkehr und die kabellose Übertragung von Energie ermöglichen.

Zunächst hatte Tesla in seinem Labor mit Sendern und Empfängern experimentiert. Dann ging er zu Antennen über, die er an Ballonen befestigte und über dem Labor oder seinem Hotel in Manhattan schweben ließ. Auch das funktionierte. Der nächste Schritt bestand darin, sein Labor in New York zu schließen und in die Rocky Mountains überzusiedeln. Am Fuß des Pikes Peak bei Colorado Springs hatte er genug Platz, um größere Sender und Empfänger zu errichten.

Zwar war Amerika gerade erst mit einem Stromnetz erschlossen worden. Doch Tesla begriff dies als Zwischenstufe auf dem Weg zu einem kabellosen System, das Informationen und Energie übertragen sollte. Wie mancher andere Ingenieur seiner Zeit vermutete er, dass die Radiowellen, die ein Sender durch die Luft zum Empfänger sandte, nur einen Teil des Übertragungsvorgangs ausmachten. Gleichzeitig müsse durch die Erde ein Rückstrom vom Empfänger zurück zum Sender fließen, da beide Geräte auf dem Boden stünden. Im Gegensatz zu anderen Ingenieuren konzentrierte sich Tesla auf den erdgebundenen Rückstrom.

Müsste nicht ein Sender Radiowellen durch die Erde zum Empfänger schicken und die Atmosphäre für den Rückstrom nutzen können? Vielleicht könnte eine Sendeanlage so lange elektromagnetische Energie in die Erdkruste pumpen, bis die elektrische Resonanzfrequenz unseres Planeten erreicht wäre. Die vor Energie pulsierende Erdkugel könne man anschließend überall auf der Welt mit Empfängern anzapfen.

Diese Idee wollte Tesla in Colorado Springs überprüfen. Schon bald war er davon überzeugt, sein Ziel erreicht und elektrische Energie in die gesamte Welt übertragen zu haben. Mehr noch: Er war sogar davon überzeugt, dass seine Signale bis zum Mars gelangt seien und er von dessen Bewohnern eine Antwort empfangen habe!

Bereits im Jahr 1900 kehrte der Erfinder nach New York zurück. Siegesgewiss mietete er sich im luxuriösen Hotel Waldorf-Astoria ein und schrieb für die Zeitschrift »Century« einen langen Aufsatz über »Das Problem des wachsenden Energiebedarfs der Menschheit« – und war bereit für den Triumphzug seiner neuen Technologie, die dieses Problem lösen sollte.

Kontaktaufnahme mit den Sternen

In kurzer Zeit hatte Tesla einen neuen Unterstützer gefunden. Der Industrielle J. Pierpont Morgan war bereit, 150 000 US-Dollar in die Vision zu investieren. Diese Summe wurde für den Bau eines neuen Labors in Wardenclyffe veranschlagt, einem Dorf an der Nordküste von Long Island im Bundesstaat New York. Doch das Geld reichte dafür nicht aus. Morgan weigerte sich, das Projekt weiter zu unterstützen. Dennoch ließ Tesla einen 56 Meter hohen Sendeturm in Wardenclyffe errichten, der Funksignale nach Europa und elektrische Energie in das Erdinnere befördern sollte. Trotz seiner guten Kontakte zu New Yorks betuchter Oberschicht bekam der Erfinder nicht genug Geld zusammen,

▼ **An der Wand des New Yorker Labors, in dem Tesla 1916 arbeitete, hingen Zeichnungen seiner Dampfturbine (links). Mark Twain führt in New York eine Lampe vor, die auf Grund des Starkstroms leuchtet, der durch seinen Körper fließt. Am linken Bildrand ist zu sehen, wie Tesla den Apparat bedient.**

LINKS: CORBIS / BETTMANN

Der 56 Meter hohe Turm von Wardenclyffe krönte Teslas Labor, das er 1901 auf Long Island bei New York errichtete. Die Anlage sollte der transatlantischen Kommunikation per Funk dienen, als Rundfunksender sowie für die weltweite Übertragung elektrischer Energie. Im Jahr 1917 wurde der Turm abgerissen.

um die riesige Antenne in Betrieb zu setzen. Infolgedessen erlitt er einen Nervenzusammenbruch.

Teilweise genesen, aber weiterhin auf der Suche nach Sponsoren für das Labor in Wardenclyffe, wandte sich Tesla wieder dem Maschinenbau zu. Er vermutete, dass immer mehr Kraftwerke von kolbengetriebenen Dampfmaschinen auf rotierende Dampfturbinen umsteigen würden. Das brachte ihn auf die Idee, eine schaufellose Turbine zu konstruieren.

Genauso wie ein rotierendes Magnetfeld den Rotor eines Wechselstrommotors mit sich zieht, könnte der Dampf eine Reihe von dünnen, dicht beisammenliegenden Scheiben, die an der Turbinenachse befestig sind, mittels viskoser Kräfte hinter sich herziehen – also mit Scherkräften, deren Größe von der Fließgeschwindigkeit einer Flüssigkeit abhängt. Um zu funktionieren, hätte die Turbine mehr als 10 000 Umdrehungen pro Minute erreichen müssen – doch das hielten die dünnen Stahlscheiben von damals nicht aus.

Zwar fand Tesla keine Geldgeber für den Bau dieser Turbine, doch immerhin gelang es ihm, ein Fahrzeugtachometer patentieren zu lassen, das auf demselben Prinzip beruhte. Dieses Gerät war so erfolgreich, dass Tesla zwei Jahrzehnte lang von den Lizenzeinnahmen des Tachos leben konnte. Zwischendurch schrieb er Artikel für populäre Zeitschriften, in denen er über die Zukunft der Elektrizität und des Rundfunks spekulierte.

Bis dahin konnte Tesla immer wieder seinem Schicksal eine neue Wendung geben. Doch nun gelang ihm dies nicht mehr. Er wurde depressiv und entwickelte sich zu einem Einsiedler, der in Hotels lebte und der, sobald die Rechnung fällig wurde, in das nächste zog.

Erst anlässlich seines 75. Geburtstags im Jahr 1931 erfuhr eine breitere Öffentlichkeit davon, worüber Tesla inzwischen nachdachte. In einer Titelgeschichte der Zeitschrift »Time« erklärte der Erfinder, wie man Kontakt mit den Sternen aufnehmen könne. Dies sei mit dem »Teslaskop« möglich – einem riesigen Funksender.

Von nun an lud Tesla in jedem Jahr zu seinem Geburtstag Reporter zu einer Pressekonferenz ein – für ihn eine Gelegenheit, immer wieder vor den Gefahren eines Weltkriegs zu warnen. Eine solche Katastrophe sei allein durch die Entwicklung einer Superwaffe abzuwehren, mit der ein Gleichgewicht des Schreckens hergestellt werden könne. Als ultimative Abschreckung begriff er eine Strahlenkanone, die gewaltige Energiemengen direkt auf feindliche Flugzeuge, Schiffe und Heere lenken könne.

Im Jahr 1937 wurde Tesla während eines Stadtbummels in New York von einem Taxi angefahren. Davon erholte sich der Erfinder nie mehr vollständig. Er starb am 8. Januar 1943 im Alter von 87 Jahren.

Wie kaum ein anderer Wissenschaftler oder Ingenieur erscheint Nikola Tesla im Rückblick als umstrittene Person. Seine Erfindungen haben zur Entwicklung der Elektrotechnik wesentlich beigetragen. Das wurde 1956 von der Pariser Generalkonferenz für Maße und Gewichte gewürdigt, welche die Einheit der magnetischen Flussdichte nach ihm benannte. Durch seine oft übertriebenen Behauptungen und fantastischen Visionen wurde Tesla jedoch auch zu einem Schutzheiligen spiritueller Randgruppen.

Dass er sich ganz auf die Schönheit grundlegender Konzepte konzentrieren konnte, war seine größte Stärke. Doch gleichzeitig war es auch seine größte Schwäche, denn gefangen in dieser Faszination verlor er den Blick für das, was praktisch möglich war. ◁

W. Bernard Carlson ist Professor für Naturwissenschaft, Technik und Gesellschaft an der Universität von Virginia. Er forscht über die kreativen Arbeitstechniken von Erfindern wie Thomas A. Edison, Alexander Graham Bell und Elihu Thomson.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Empires of Light: Edison, Tesla, Westinghouse, and the race to electrify the world. Jill Jonnes. Random House 2003

Nikola Tesla: Collected German and American patents. Michaels-Verlag 2000

Tesla: Master of lightning. Von Margaret Cheney und Robert Uth. Barnes & Noble 1999

Wizard: The life and times of Nikola Tesla. Von Marc J. Seifer. Birch Lane Press, New York 1996

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

REZENSIONEN

GEOGRAFIE

Thomas Cussens (Text);
Richard Chiles, Paul Karwinski und Mike Oehlers (Bildaufbereitung und -interpretation)

Bilder der Erde

Satellitenfotos aus dem All

Aus dem Englischen von Werner Horwath.
Gerstenberg, Hildesheim 2006. 288 Seiten, € 49,90

Das Delta eines sibirischen Flusses sieht aus wie eine prachtvolle Fächerkoralle (Bild unten). In der Wüste Libyens scheint jemand mit einem Filzstift rote Punkte getupft zu haben – es sind aber von Sprinklern kreisförmig bewässerte Flächen. Die Regenwälder Rondônias an der Grenze Brasiliens zu Bolivien erstrahlen noch 1984 in gesundem Dunkelrot, das mittlerweile aber arg abgekratzt aussieht, als ob die hellblaue Farbe – sie gibt die gerodete Fläche wieder – ein Untergrund wäre.

Die merkwürdigen, zum Teil sehr eindrucksvollen Farben sind nicht einfach »Falschfarben«, sondern geben die vom Boden abgestrahlte elektromagnetische Energie wieder – nur mit verschobenem Spektrum.

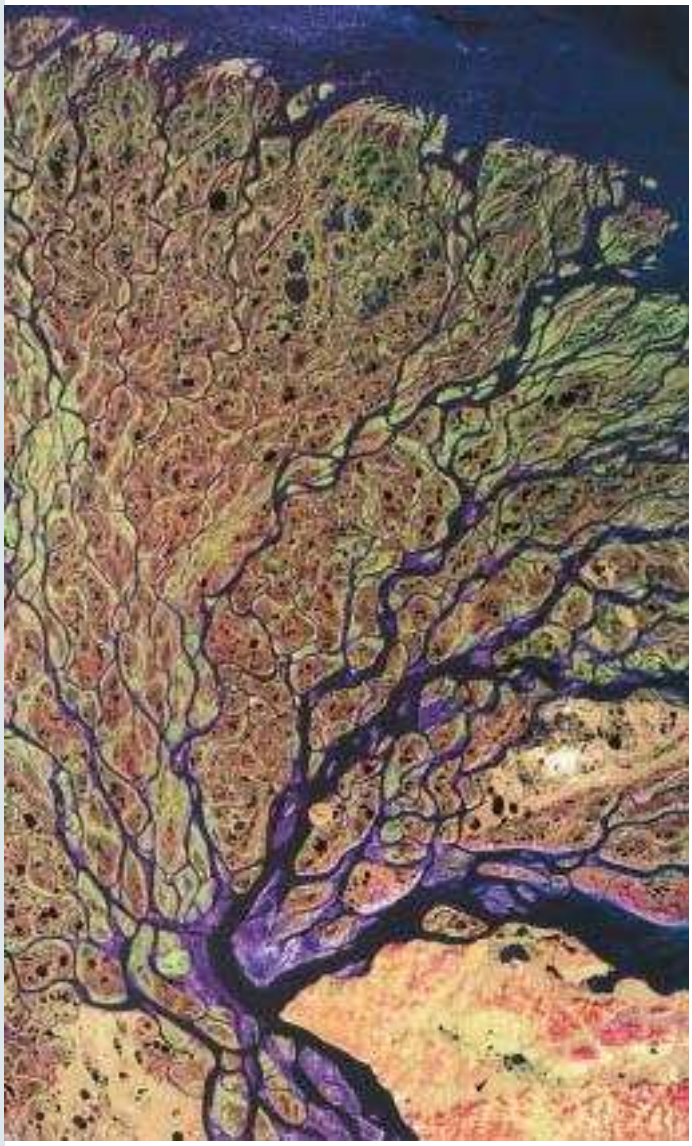
In seitenfüllenden Bildern wird die ganze Erde abgedeckt, mit einer gewissen Bevorzugung der USA. Zahlreiche Fotos sehen aus wie aus einem niedrig fliegenden Flugzeug aufgenommen; aber es war wirklich ein Satellit! Die digitale Aufnahme- und Bearbeitungstechnik ist inzwischen so weit fortgeschritten, dass unglaubliche Vergrößerungen und Filterung bis zu natürlichen Farben möglich sind.

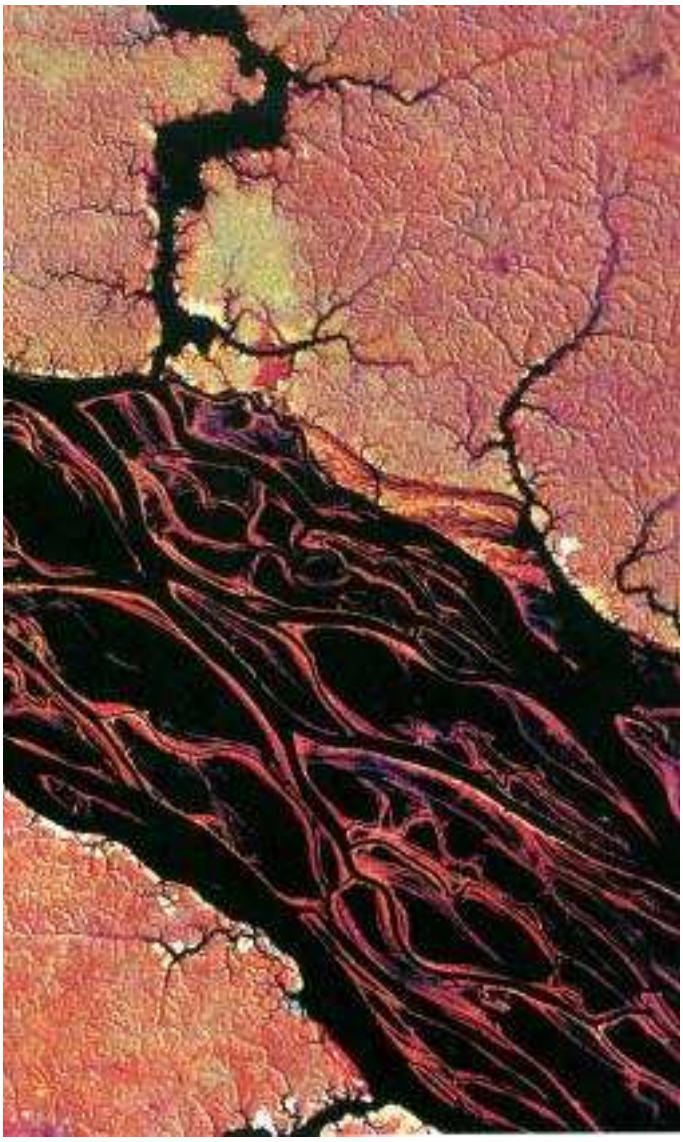
Das sterbenslangweilige Vorwort des Kosmonauten Sigmund Jähn kann den Wert dieses Prachtbands nicht ernsthaft beeinträchtigen. Wer mit wachem Auge hinschaut, gewinnt jedem Bild etwas fantastisch Neues ab.

Alice Krüßmann

Die Rezensentin ist Bildredakteurin bei Spektrum der Wissenschaft.

Vielfach verzweigt mündet die Lena ins Nordpolarmeer (links). Schwarz durch hohen Gerbstoffgehalt ist der Rio Negro, der größte Nebenfluss des Amazonas, in echten wie in falschen Farben.





UMWELTPOLITIK

James Gustave Speth

Wir ernten, was wir säen

Die USA und die globale Umweltkrise

Aus dem Englischen von Kurt Beginnen und Sigrid Kuntz.
C. H. Beck, München 2005. 283 Seiten, € 22,90

Wir sind derzeit verantwortlich für das sechste große Massenaussterben in der Erdgeschichte, und das größte, seit vor 65 Millionen Jahren die Dinosaurier verschwanden«. Diese Einschätzung hat nicht etwa Greenpeace in die Welt gesetzt – sie ist im kürzlich veröffentlichten Report »Global Biodiversity Outlook 2« zu lesen, der für die UN-Konvention über biologische Vielfalt angefertigt wurde. Der Umweltschutz hat sich als politisches Thema längst etabliert. Amerika, der Hauptakteur auf der globalen Bühne, ziert sich allerdings seit ein paar Jahren.

James Gustave Speth, ein Vorkämpfer der amerikanischen Ökologiebewegung, zieht jetzt Bilanz über die vergangenen vierzig Jahre Umweltpolitik der USA. Sein Urteil hat Gewicht, denn der Professor für Umweltpolitik und nachhaltige Entwicklung an der Yale University beriet nicht nur die US-Präsidenten Jimmy Carter und Bill Clinton, sondern gründete auch die Naturschutzorganisation »Natural Resources Defense Council« und leitete von 1993 bis 2000 das Entwicklungshilfeprogramm der Vereinten Nationen. Im Jahr 2002 wurde er mit dem renommierten japanischen »Blue Planet Prize« ausgezeichnet.

Wie steht es heute um die Ökosysteme des Planeten Erde? Das Artensterben hat eine globale Dimension erreicht, der Ozonschild schwächelt, durch den Klimawandel verschieben sich Vegetationszonen, doch Treibhausgase wie Kohlendioxid werden unvermindert in die Atmosphäre geblasen. »Über ein Drittel der Landfläche der Erde wurde bereits zur Nutzung … umgewandelt; ein weiteres Drittel könnte in diesem Jahrhundert hinzukommen«. An den Folgen haben der Boden, das Süßwasser, Tier- und Pflanzenarten zu leiden. Immer neue Chemikalien werden auf die Umwelt losgelassen, ohne dass Prüfverfahren die Verträglichkeit vorher nachweisen würden. Weite Teile Süd- und Ostasiens sind in giftigen Smog getaucht.

Das globale Desaster wurde früh vorausgesehen, konstatiert der Autor. Schon in den 1970er Jahren wuchs in den USA eine entschlossene Umweltbewegung heran, deren Wirkungen bis ins Weiße Haus reichten. Im Jahr 1980 listete der Bericht »Global 2000«, an dem Speth mitarbeitete, für die Regierung des damaligen Präsidenten Jimmy Carter die Kernprobleme der Umwelt auf.

Immerhin: Auf die Bedrohung der Ozonschicht wurde angemessen und schnell reagiert. Doch die anderen Krankheiten des Planeten haben sich inzwischen verschlimmert. Speth schildert klar, welche politischen Unzulänglichkeiten dazu geführt haben: Rechtsvorschriften wurden nicht entschlossen genug umgesetzt, die Abstimmungsverfahren internationaler Konventionen sind zu lasch, der Druck von Seiten der Unternehmen war zu groß. Speth geißelt aber vor allem die aktuelle wirtschaftsnahe Umweltpolitik der US-Regierung unter George W. Bush; ihr misst er die Hauptverantwortung für den aktuellen Stillstand zu.

Doch das Buch ist keine Anklageschrift. In der zweiten Hälfte betreibt der Autor intensive Ursachen- und Lösungsforschung. Bevölkerungswachstum, Armut, unbedachter Konsum und das Versagen von Markt und Politik in der Globalisierung seien die Gründe für das ökologische Debakel. Speth beklagt vor allem, dass das Wirtschaftswachstum zum »Fetisch« erhoben werde – heißt es aber gleichwohl als Mittel zur Überwindung des Armutsproblems willkommen.

In den Preisen für alle Wirtschaftsgüter sollte auch enthalten sein, was die verwendeten Umweltressourcen für die Menschen leisten. Damit die Armut besser bekämpft werden könne, dürfe die Weltbevölkerung nicht weiter so schnell wachsen wie bisher. Ein Technologiewandel im Energie- und Abfallsektor soll helfen, Rohstoffe einzusparen.

Was folgt, ist purer Balsam für die europäische Seele, denn der Autor preist die ökologische Politik des Alten Kontinents über den grünen Klee. Schon im Vorwort für die deutsche Ausgabe ruft er aus: »Lass, Europa, nicht locker, wenn es

um die Umwelt geht. Die Welt – besonders Amerika – braucht Dich!« Im vorletzten Kapitel des Buchs lobt er die europäischen Staaten als Beispiele für »good governance«, gute Regierungsführung. Am liebsten würde er eine Weltumweltorganisation gründen, die »Wachhund, Ombudsmann und Katalysator« für die Umwelt wäre.

Welche kurzfristigeren Strategien können dem Desaster Einhalt gebieten? Speth ist erfahren genug, nicht alles auf die Karte »Umweltpolitik« zu setzen; er misst sogar der zivilgesellschaftlichen Alternative privater und unternehmerischer Initiativen größere Erfolgschancen bei: »Umweltgruppen, Verbrauchergruppen, … Unternehmen, … Stiftungen, religiöse Organisationen, Investoren und andere engagieren sich in einer … Fülle von Initiativen, die … Hoffnung geben.« Beispiele gebe es zuhauf, etwa dieses: »Sieben große Unternehmen«, darunter Shell und BP, »sind darin übereingekommen, ihre Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2010 um 15 Prozent gegenüber dem Stand von 1990 zu senken.«

Ziviles Engagement ergänzt die Politik

In seinem abschließenden Plädoyer spielt der Autor interessanterweise auf den Publizisten Robert Kagan an, der 2002 den transatlantischen Konflikt mit den Worten charakterisierte, die US-Amerikaner kämen vom Mars, die Europäer aber von der Venus. Speth ergreift entschieden Partei gegen den Kriegsgott und für die Göttin der Liebe: »Im 21. Jahrhundert müssen wir von der Venus abstammen – und pflegen, hegen und bewahren.«

Der Altmeister der amerikanischen Umweltdiskussion hat mit seinem Buch eine flammende Streitschrift vorgelegt, in der er nicht bloß beschreibt, in welchem Ausmaß die Natur weltweit zerstört wird. Speth demonstriert auch anhand zahlreicher Beispiele, wie das scheinbar Unmögliche realisiert werden könnte: die Umwelt und die Wirtschaft miteinander zu versöhnen. Er erinnert daran, dass in den 1970er Jahren die USA die Vorreiter im Umweltschutz waren. Mit europäischer Hilfe, suggeriert der Autor, könnte dies wieder so werden.

Sven Titz

Der Rezensent ist promovierter Meteorologe und freier Journalist in Berlin.

MEDIZIN

Hans Rinecker

Protonentherapie

Neue Chance bei Krebs

Herbig, München, 2005. 223 Seiten, € 22,90

Die klassische Tumortherapie mit Röntgenstrahlen hat ein notorisches Problem: Die energiereichen Photonen entfalten ihre größte Wirkung nahe der Körperoberfläche und schwächen sich dann exponentiell ab. Die größte Zerstörung richten sie also nicht am Zielort an, sondern schon unterwegs. Nur indem man den Tumor aus verschiedenen Richtungen bestrahlt, kann man ihm überhaupt eine größere Strahlendosis applizieren als dem umgebenden Gewebe.

Ein auf den Tumor gerichteter Strahl aus Protonen dagegen richtet auf seinem Weg nur mäßigen Schaden an. Erst am Zielort zerstören die positiv geladenen Wasserstoffionen die Zellen – wie ein Steckschuss. Die Therapie ist im Prinzip nicht ganz neu; schon vor 50 Jahren wurden die ersten Patienten mit Protonen bestrahlt. Doch erst in jüngster Zeit ist durch technische Fortschritte das Verfahren in größerem Maßstab anwendbar geworden.

Hans Rinecker leitete drei Jahrzehnte eine chirurgische Klinik in München. In einem Alter, in dem andere in den Vorruhestand gehen, wagte er sich mit dem Aufbau eines Protonentherapiezentrums noch einmal an ein völlig neues Projekt. Das Zentrum hat im März letzten Jahres seinen Betrieb aufgenommen und ist das erste seiner Art in Europa.

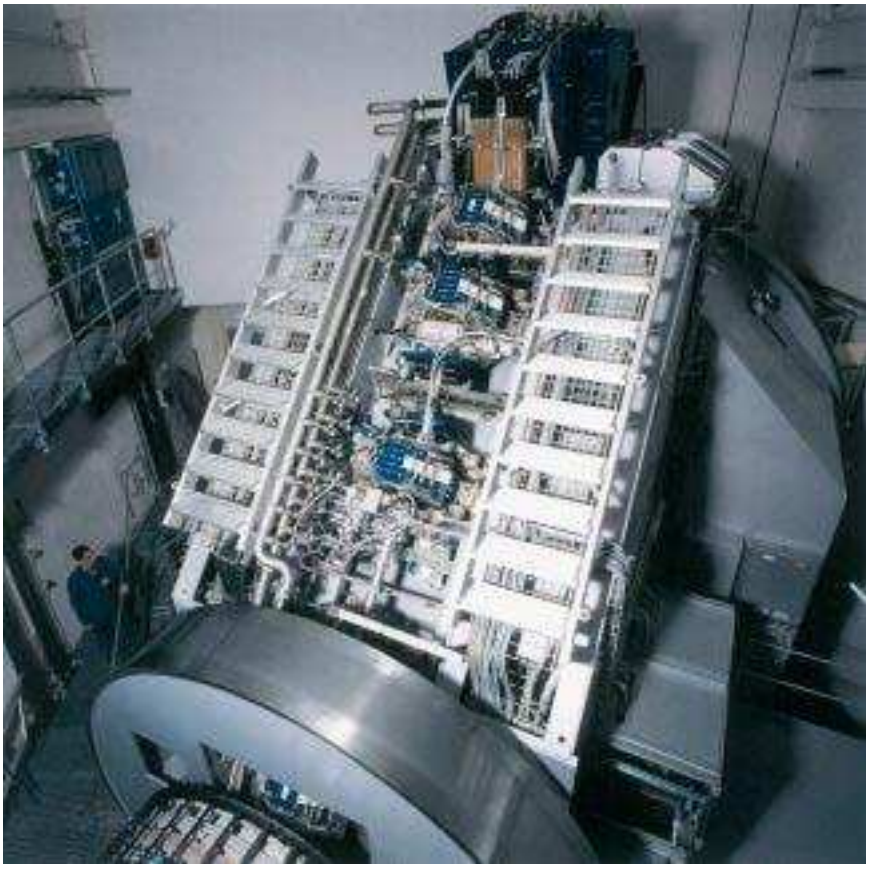
Sein Buch zum Thema ist lebendig geschrieben, klar gegliedert und mit 55 farbigen Abbildungen reichlich illustriert. Ein umfangreiches Glossar erklärt wichtige Begriffe. Technische Details werden in einem eigenen, nach hinten gestellten Kapitel abgehandelt, was den Haupttext entlastet.

Nach der Beschreibung der biologischen Grundlagen und der Behandlungsansätze führt Rinecker das Konzept der Protonentherapie ein und vergleicht es mit dem der konventionellen Röntgentherapie. Am Beispiel ausgewählter Tumoren veranschaulicht er die vorteilhafte Dosisverteilung von Protonen im Körper. Die Ausführungen gipfeln in der Forderung: »Protonenstrahlen sind als Methode erster Wahl immer der Röntgenstrahlung vorzuziehen.« Weitere neue Therapieansätze, die er ebenfalls diskutiert, stellen für ihn mittelfristig keine wirkliche Alternative dar.

Wie der Autor im Vorspann eingesteht, betreibt er im folgenden Kapitel Werbung für sein Münchner Protonentherapiezentrum. Anschaulich beschreibt er den gesamten Ablauf der Behandlung, vom Erstkontakt bis zur Nachuntersuchung. Unvermutet findet sich der Leser hier als potenzieller Patient wieder, während dieses Buch doch für einen weiten Leserkreis bestimmt ist. Aber wer darüber hinwegsieht, kann auch diese Passage mit großem Wissensgewinn lesen.

Sehr viel schwerer wiegt, dass der Autor an anderer Stelle der Werbung für sein Konzept zuliebe vor Polemik nicht zurückschreckt. So qualifiziert er in zwei ähnlichen Grafiken die Behandlung mit Röntgenstrahlen – wenn auch mit Fragezeichen – einmal als unterlassene Hilfeleistung, ein weiteres Mal als Körperverletzung, ohne konkreter zu werden. Dabei wäre durchaus wünschenswert zu erfahren, bei welchen Tumoren mit Röntgenstrahlen die therapeutisch notwendige Strahlendosis nicht erreicht wird oder nur um den Preis, dass gesundes Gewebe unverhältnismäßig stark belastet wird. Statt die Vorteile der Protonentherapie an konkreten Beispielen zu quantifizieren, begnügt er sich mit allgemeinen Dosisverlaufschemen, um die Röntgentherapie mit Pauschalkritik zu überziehen.

Für einige Fälle, vor allem tief liegende oder an besonders empfindliches Gewebe grenzende Tumore, ist die Überlegenheit der Protonentherapie unumstritten; dafür nennt Rinecker auch Beispiele. Doch für die meisten Indikationen ist nicht bekannt, ob sich der konzeptionelle Vorteil in einen besseren klinischen Erfolg umsetzen lässt. Nur klinische Studien können diese Frage beantworten. Diese wurden zwar für einige Indikationen auch



Ein riesiges Zielgerät *(Gantry)* lenkt den Protonenstrahl in wählbarer Richtung auf den Patienten (zum Größenvergleich: Monteur am linken Bildrand).

schon durchgeführt. Aber das Argument, dass noch keine Studie die Unterlegenheit der Protonentherapie nachgewiesen habe, kann nicht wirklich überzeugen.

Die Forderung, Röntgenstrahlen generell durch Protonen zu ersetzen, ist auch im Hinblick auf die hohen Kosten fragwürdig. Der Autor bestreitet zwar, dass die Behandlung mit Protonen teurer ist als die mit Röntgen, nennt aber keine Zahlen. Tatsächlich kostet eine Protonentherapie heute mit 18 000 Euro mindestens dreimal so viel wie eine optimierte Röntgentherapie, genaue Zahlen hängen natürlich immer vom Einzelfall ab. Zu Recht fordert er, die gesamte Strahlenbelastung der Bevölkerung zu verringern. Doch um die gesamte finanzielle Belastung der Bevölkerung zu erhöhen, muss es bessere Gründe geben.

Leider versäumt der Autor, sich sachlich mit der Position der Experten auseinander zu setzen, die der Protonentherapie etwas reservierter gegenüberstehen. Für seine pauschale Verurteilung von Röntgenstrahlen hat er jedenfalls nur wenige Argumente vorzuweisen.

Trotz des Mangels an kritischer Distanz ist das Buch lesenswert, informiert es doch umfassend über die neue Therapie und vermag durch den lebendigen Schreibstil zu begeistern. Hier kämpft ein leidenschaftlicher Verfechter für den Erfolg seines Projekts. Immerhin dürfen dank seines Engagements einige Betroffene tatsächlich auf das hoffen, was der Buchtitel verspricht – eine neue Chance bei Krebs.

Achim G. Schneider

Der Rezensent ist promovierter Biologe und freier Wissenschaftsjournalist bei Freiburg.

THRILLER

Kevin Guilfoile

Das Gesicht des Mörders

Aus dem Amerikanischen von Werner Löcher-Lawrence.
Bloomsbury, Berlin 2006. 434 Seiten, €19,90

Dieser Roman folgt dem klassischen Muster der Sciencefiction: Unterstelle, die Welt sei so, wie sie in Wirklichkeit ist, mit einer einzigen Ausnahme, und zeichne erzählend die Konsequenzen dieses einen Unterschieds nach. Überlichtgeschwindigkeit, Zeitreisen und Telepathie sind beliebte Beispiele.

In diesem Erstlingswerk des amerikanischen Journalisten Kevin Guilfoile ist es das reproduktive Klonen: Mit vernachlässigbarer Misserfolgsrate kann man die DNA eines beliebigen Menschen in eine Eizelle einbringen, aus der sich dann auf natürlichem Wege ein mit dem Vorbild genetisch identischer Mensch entwickelt – ein Klon eben. Im Übrigen spielt die Geschichte in der weit gehend unveränderten Gegenwart von Guilfoiles Heimatstadt Chicago.

Getrieben von dem Kinderwunsch zahlreicher Paare, die ihr eigenes Erbgut nicht weitergeben können oder – wegen der Gefahr von Erbkrankheiten – wollen, hat sich eine florierende Klonindustrie entwickelt. Bedenken derjenigen, die da- ▷

▷ durch die Einzigartigkeit menschlichen Lebens gefährdet sehen, haben zu strengen gesetzlichen Regelungen und staatlicher Kontrolle geführt. So dürfen nur bereits Verstorbene geklont werden, »damit nicht plötzlich jemand im Supermarkt seinem Ebenbild gegenübersteht«. Gleichwohl bekämpfen christlich-fundamentalistische Gruppen die Klonkliniken bis aufs Messer, so wie das in der Realität von den Abtreibungskliniken bekannt ist.

Held der Geschichte ist der prominente Klonarzt Davis Moore. Als seine über alles geliebte Tochter mit 17 Jahren ermordet wird und die Suche nach dem Mörder erfolglos bleibt, fasst er den wahnwitzigen Entschluss, aus dem Sperma, das der Leiche seiner Tochter entnommen wurde, einen Klon heranwachsen zu lassen, um dereinst dem Mörder seiner Tochter ins Gesicht sehen zu können. Da er damit einen krassen Gesetzesverstoß begeht, muss er das Kind einem ahnungslosen Elternpaar unterschieben.

Der kleine Justin wächst zunächst als ganz normales Kind heran, allerdings mit einer phänomenalen Intelligenz und einem beunruhigenden Interesse für philosophische Fragen. Durch allerlei Zufälle kommt er allmählich dahinter, welche Rolle ihm sein »Schöpfer« zugedacht hat, ergreift im Verlauf der Handlung immer entschlossener selbst die Initiative und bringt im Alter von 17 Jahren den Mann, »nach dessen Bild er geschaffen wurde«, zur Strecke: einen erfolgreichen Anwalt und klassischen Widerling namens Sam Coyne. Damit hätte am Ende – auf etwas exotischem Wege – die Gerechtigkeit gesiegt, womit die Erwartung des Standard-Krimilesers befriedigt wäre.

Der eine Mörder ist der Gärtner …

Und genau das passiert nicht. Guilfoile hat in seine Handlung so viele dumme Zufälle und unglaubliche Überraschungen eingebaut, dass von den gewohnten amerikanischen Klischees, über die man als Europäer so gerne lästert, fast nichts übrig bleibt. Die Unterscheidung zwischen Gut und Böse verschwimmt bis zur Unkenntlichkeit. Die Sympathie, die der Autor anfangs für seinen Helden erzeugt, schwindet, als der prominente Weißkittel vor lauter Verbissenheit und Ungeschicklichkeit bei seiner Mördersuche seine Ehe ruiniert und seine Frau sich das Leben nimmt.

Am Ende brechen dann auch noch alle sorgfältig gehegten Erwartungen zusammen: Sam Coyne war gar nicht der Mörder des Mädchens, die vermeintliche Vergewaltigung war ein höchst einvernehmlicher Sex zwischen zwei 17-Jährigen, und erst auf den letzten Seiten gibt ein christlicher Fundamentalist, der nach einer ungeheuer erfolgreichen Mörderkarriere – reichlich achtzig Klonärzte, ohne je erwischt zu werden – seine alten Tage mit der Pflege seines Gärtleins zubringt, zu Protokoll, dass er leider auch die Tochter seines eigentlich ausersehenen Opfers erwürgen musste, um seine alles entscheidende Tarnung nicht auffliegen zu lassen. Übrigens ist ihm klar, dass er für die Taten, die Gott selbst ihm befohlen hat, in der Hölle wird büßen müssen – offensichtlich erfordert tiefer Glaube auch die Bereitschaft, etwas krassere Widersprüche hinzunehmen.

Zu allem Überfluss hätte Davis Moore von Anfang an wissen können, dass der Sexpartner und der Mörder seiner Tochter verschiedene Leute waren, wenn er es nur über sich gebracht hätte, die Vernehmungsprotokolle der Morduntersuchung vollständig durchzulesen. Die ganze Mühe mitsamt der gezielten Erschaffung eines Menschen umsonst …

… und der andere bleibt unbekannt

Allerdings bedient der Roman ein spezielles Klischee, und zwar so intensiv, dass es wehtut: das Klischee vom geborenen Verbrecher. Um Sam Coyne seiner gerechten Strafe zuzuführen, vergewaltigt und ermordet der 17-jährige Justin eine Frau und richtet die Leiche so her, wie – nach seiner Überzeugung – Coyne es zu tun pflegte. Die DNA des Täters ist identisch mit der von Sam Coyne, wie das bei Klonen so ist; das ist das unanfechtbare Beweismittel, auf Grund dessen Coyne am Ende mit der Giftspritze hingerichtet wird. Ob er nun der gesuchte Massenmörder war, für den Justin – und bis jetzt der Leser – ihn hält, lässt der Roman offen.

Aber auch Justin selbst kommt zu der Überzeugung, dass er sterben muss: nicht nur weil er einen Mord begangen hat, sondern weil er dabei in sich die unstillbare Mordlust gespürt hat, die – vermutlich – auch das Original trieb, und sich sicher ist, mit dem Morden nicht aufhören zu können. Davis Moore selbst besorgt ihm die Giftspritze samt Zubehör nach amtlichem Muster. ▷

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online

Manfred Keil und Bruno P. Kremer (Hg.)
Wenn Monster munter werden
Einfache Experimente aus der Biologie
Wiley-VCH, Weinheim 2003, 235 Seiten, € 32,90

Häufig muss der Biologieunterricht ohne Schulexperimente auskommen. Dabei könnten Schüler in vieler Hinsicht profitieren: Experimente wecken die Neugier, machen Schüler zu Jungforschern und dienen nicht nur der Überprüfung vorher erarbeiteter Hypothesen, sondern lassen ein motivierendes »Heureka-Gefühl« aufkommen.

In diesem Buch werden scheinbar triviale Fragestellungen originell gelöst: So hilft das »Labor in der Saftflasche«, wichtige Fragen aus der Limnologie wie Eutrophierung zu beantworten. Und spannende Versuchsanregungen zur menschlichen Wahrnehmung oder zu Grundlagen der Selbstorganisation runden ein abwechslungsreiches Programm ab. Es sei allen Lehrern, aber auch Hochschullehrern, als Anregung empfohlen.

Aus der Rezension von Daniel C. Dreesmann

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Didaktik	■■■■■
Suchen/Finden	■■■■
Lesespaß	■■■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	22

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/rezensionen

▷ An dieser Stelle sträubt sich mir alles. Ich bin ja bereit, dem Autor um der spannenden Handlung willen einige höchst unplausible Dinge zu glauben. Aber dass ein junger Mann, behütet aufgewachsen, philosophisch sehr belesen und über sich selbst intensiv reflektierend, schlicht nicht anders kann, als den Befehlen seiner Mördergene zu folgen, sich dessen auch noch voll bewusst ist und entsprechend sorgfältige Vorkehrungen für einen stilvollen Abgang trifft: Das kann einfach nicht sein, sagt meine Überzeugung von der Autonomie der Persönlichkeit – und lässt sich auch durch die aktuellen Auffassungen einiger Hirnforscher nicht davon abbringen.

Die Übersetzung ist eigentlich hervorragend. Aber ebenso wie zahlreiche seiner Kollegen hat auch dieser Übersetzer keinen Anlass gesehen, »potassium« im Lexikon nachzusehen. Das merkwürdige Potassiumchlorid, mit dem die Verurteilten – im Roman wie in der Realität – vom Leben zum Tode befördert werden, ist schlichtes Kaliumchlorid.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Sind Sie auf folgenden Messen?

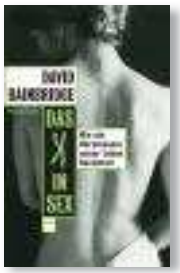
HANNOVER MESSE — Messe Hannover — *24.–28.04.06 Halle 02, A51*

Analytica 2006 — Neue Messe München — *25.–28.04.06 Halle A1, 507*

Atronomie-Börse — Gesamtschule Bockmühle Essen — *13.05.06*

ACHEMA 2006 — Messe Frankfurt — *15.–19.05.06 Halle 1.2, B30*

Dann schauen Sie doch einfach einmal beim Spektrum-Stand vorbei. Wie immer halten wir für unsere Abonnenten eine kleine Überraschung bereit.



BIOLOGIE

David Bainbridge

Das X in Sex

Wie ein Chromosom unser Leben bestimmt

Aus dem Englischen von Sebastian Vogel.
Wagenbach, Berlin 2005. 240 Seiten, € 12,90

Wie ein Mensch zu Mann oder Frau wird, war lange ein ungelöster Fall – das Aktenzeichen XY der Biologie sozusagen. Heute beschreiben diese beiden Buchstaben einen der faszinierendsten Vorgänge der individuellen Entwicklung: das Werk des X- und des Y-Chromosoms.

Nur während der Zellteilung sortiert sich das im Kern jeder Zelle enthaltene Erbgut so übersichtlich, dass seine Bestandteile unter dem Mikroskop erkennbar sind. Diese Chromosomen kommen sämtlich paarweise vor; nur bei den Männern gibt es ein ungleiches Paar. Als Hermann Henking das 1890 entdeckte, nannte er den größeren Partner X-Chromosom, ohne zu wissen, dass es tatsächlich, wie fast alle anderen, in manchen Stadien X-förmig ist.

Der englische Tierarzt und Zoologe David Bainbridge hat dem Außenseiter jetzt, über hundert Jahre später, ein ganzes Buch gewidmet. »Das X in Sex« beschreibt in verständlicher Sprache, was Chromosomen sind, was sie bewirken und wie sie das Geschlecht eines Menschen bestimmen. Während der Titel eher ein oberflächliches Geplänkel über Männer und Frauen vermuten lässt, geht Bainbridge durchaus in die Tiefe. So erfährt der Leser, was aus Embryonen mit außergewöhnlichen Kombinationen von X und Y wird und wie Erbkrankheiten das X als Trittbrett nutzen.

Mutig stellt sich der Autor der Frage, welches Chromosom den Geschlechterkampf in der Zelle gewinnt: Wann ist ein Mann ein Mann? Werden Frauen nur keine Männer, weil ihnen etwas fehlt – nämlich ein Y? Oder ist es das X, das buchstäblich die Fäden in der Hand hat?

Gerade in den Passagen, in denen Bainbridge das Werk von X und Y mit der Sicht auf Männer und Frauen in Verbindung bringt, merkt man ihm an, dass er extrem um »political correctness« bemüht ist. Um keinen Preis will er sich in die lange Reihe derer einordnen, welche die Wissenschaft zum Nachweis der Höherwertigkeit des Mannes missbrauchten. Aber es hilft nichts: Durch die Aktivität des Y-Chromosoms wird ein Embryo zum Jungen, während das X-Chromosom bei der »Mädchenproduktion« eher passiv bleibt. So könnte man behaupten, Frauen entstünden durch »Unterlassung«, also durch das fehlende Y. »Das ist eine spannende Idee, denn sie ist politisch unkorrekt, wissenschaftlich aber auf den ersten Blick nicht zu bestreiten.«

Mit einer guten Prise Humor erzählt Bainbridge im Kapitel »Die Hoden des Herzogs von Kent«, wie die Bluterkrankheit in europäischen Königshäusern von einer Generation zur anderen hüpfte. Glaubt man dem Autor, wäre es 1917 in Russland nicht zur bolschewistischen Revolution gekommen, hätte nicht das kleine X des Herzogs von Kent einen Knacks gehabt und in der Erbfolge den einzigen Sohn der Zarenfamilie krank gemacht.

Ein bisschen wie ein Kommissar auf der Suche nach dem Täter ist Bainbridge den Chromosomen auf der Spur. Am Ende löst er den Fall »XY« auf unterhaltsame und leicht verdauliche Weise. Für einen Genetiker wäre »Das X in Sex« sicher langweilig; der Laie hat hier aber die Gelegenheit, ohne große Anstrengung zu verstehen, welche Rolle das X und sein Kompagnon Y für den Menschen spielen.

Geschrieben von einem Dozenten an der renommierten Universität Cambridge, der keine Angst hat, durch die vereinfachte Darstellung von Wissenschaft unseriös zu wirken, ist »Das X in Sex« sehr lesenswert. Nur schade, dass die Übersetzung stellenweise allzu deutliche Spuren von Wortwahl und Satzstellung des englischen Originals trägt.

Dagny Lüdemann

Die Rezensentin ist Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Das Antiparallelogramm (II)

Das sich selbst überschneidende Viereck kann nicht nur Ellipsen aneinander abrollen lassen; es verwandelt auch die geradlinig hin- und hergehende Bewegung eines Kolbens in die kreisförmige eines Rads.

Von Norbert Treitz

Ein ebenes Viereck, bei dem zwei Paare nicht benachbarter Seiten gleich lang sind, ist nicht unbedingt ein Parallelogramm. In der letzten Folge (SdW 4/2006, S. 114) haben wir gesehen, dass sein überkreuz angeordneter Kollege, das Antiparallelogramm, Ellipsen aneinander abrollen lassen kann und mit geringem gedanklichem Zusatzaufwand auch den Strahlengang in Flüstergewölben erklärt.

Diesmal geht es um eine ganz andere Fähigkeit des Antiparallelogramms, nämlich eine Drehbewegung in eine geradlinige umzuwandeln und umgekehrt. Das haben sich die Konstrukteure von Dampfmaschinen schon immer gewünscht, und ihr Erfinder James Watt war stolz, wenigstens eine gute Näherungslösung gefunden zu haben. Pafnuti Tschebyschow (1821–1894), den die Mathematikerwelt eher in der Schreibweise Tschebyschew und als Zahlen- und Wahrscheinlichkeitstheoretiker kennt, berechnete streckenweise sehr gute Näherungen.

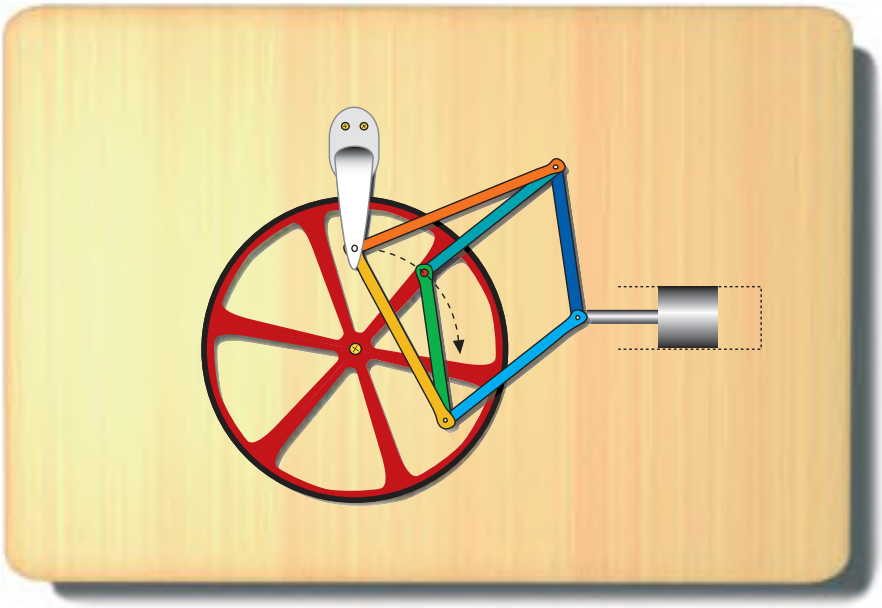
Dass eine exakte Überführung einer Drehbewegung in eine geradlinige mit einem Gestänge überhaupt möglich ist, war lange Zeit unbekannt. Harry Hart (1848–1920), über dessen Leben kaum etwas in öffentlichen Quellen zu finden ist, fand 1874 den Schlüssel des Rätsels. Die Mittelpunkte aller vier Seiten des Antiparallelogramms liegen stets auf einer gemeinsamen Geraden, was ja für Vierecke sonst eher selten zutrifft. Entlang dieser Geraden gilt eine geometrische Beziehung, die von einer speziellen Abbildung, der Inversion am Kreis, her bekannt ist: Das Produkt der Längen zweier Strecken, die auf derselben Geraden liegen und einen Endpunkt gemeinsam haben, ist eine Konstante. Die Inversion am Kreis wiederum überführt Geraden in Kreise und umgekehrt (Kasten S. 106). Der französische General Charles-Nicolas Peaucellier (1832–1913) fand 1864 ebenfalls einen exakten Inversor, der mit einer Kombination aus Drachen und Raute arbeitet (Bild unten).

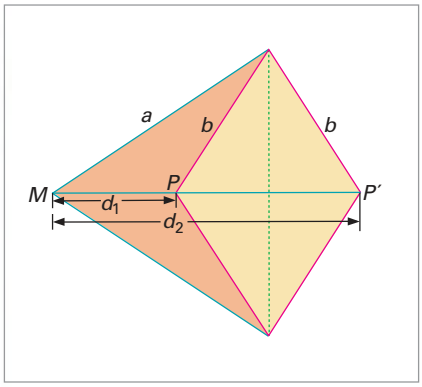
Der technische Nutzen einer exakten Geradführung ist allerdings begrenzt. Man muss zwar nicht mit besonderen Vorkehrungen das Gestänge daran hindern, den Kolben im Zylinder zu verkanten; dafür muss man zahlreiche Drehgelenke durch Schmierung beweglich halten, was nicht unbedingt weniger Aufwand erfordert.

Wir nehmen nun an, dass eine der vier Seiten des Gelenkvierecks festgehalten und deswegen als Steg bezeichnet werde, die daran hängenden heißen Arme und die dem Steg gegenüber liegende Koppel. Wenn keine Seite länger ist als die anderen drei zusammen, gibt das ein Viereck. Wenn es eben bleiben soll, hat es einen Freiheitsgrad, es ist also genau ein Winkel kontinuierlich wählbar. Nach einer Regel von Franz Grashof (1826–1893) können die Winkel an den Enden der kürzesten Seite voll durchdrehen, wenn die kürzeste und die längste Seite zusammen nicht länger sind als die anderen beiden. Je nachdem, ob diese kürzeste Seite Steg, Arm oder Koppel ist, gibt es verschiedene Typen von Kurbeln und Schwingkurbel-Gelenkvierecken.

Gelenkvierecke

Wählen wir in unserem Antiparallelogramm eine der längeren Seiten als Steg. Dann sind die beiden kürzeren die Arme und die andere längere die Koppel. Nun ist die Grashof-Bedingung auf mehrfache Weise erfüllt, allerdings mit dem Grenzfall der Gleichheit. Das bedeutet, ▷





Der Inversor von Peaucellier: Mit dem Satz des Pythagoras findet man, dass das Produkt $\overline{MP}\cdot\overline{MP'}$ nur von den Stangenlängen a und b abhängt, nämlich $a^2 - b^2$ beträgt. Links eine denkbare Realisierung

ALLE ABBILDUNGEN: SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT (SOFERN NICHT ANDERS ANGEGEBEN)

▷ dass das Gelenkviereck zwischen Parallelogramm und Antiparallelogramm umschlagen kann.

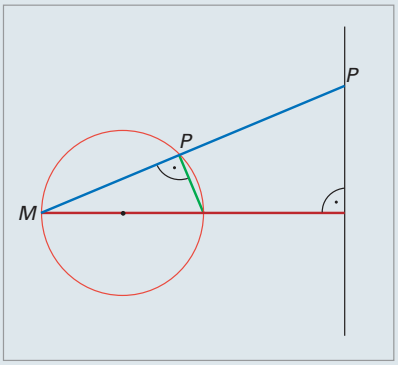
Die Punkte auf den Armen bewegen sich trivialerweise auf Kreisbögen, für die Punkte auf der Koppel muss es aber nicht so trivial bleiben. Bewegt sich das Viereck als Parallelogramm, so wandert jeder Punkt der Koppel auf einem Kreis, der die Armlänge als Radius hat. Bei der Bewegung als Antiparallelogramm laufen die Punkte der Koppel aber auf achtförmigen Kurven, ihr Mittelpunkt sogar auf einer mit zwei Symmetrieachsen. Falls Steg und Koppel um den Faktor $\sqrt{2}$ länger als die Arme sind (für den Metallbaukasten ist 7/5 eine vernünftige rationale Näherung an $\sqrt{2}$), ist die Kurve der Koppelmitte eine Bernoulli-Lemniskate (Bild rechts oben).

Diese Kurve ist das Inversionsbild einer rechtwinkligen Hyperbel an dem Kreis, der deren Hauptachse als Durchmesser hat. Sie ist eine spezielle Cassini-Kurve; das ist eine Menge von Punkten, für die das Produkt der Abstände zu zwei gegebenen Punkten eine Konstante ist.

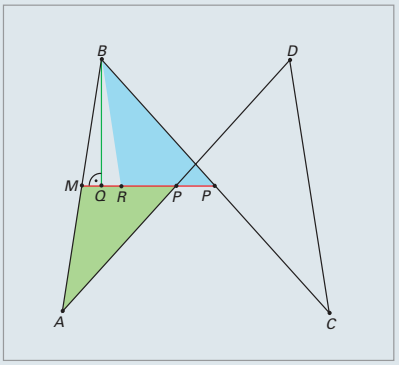
Die mathematisch exakte Geradführung

Die Inversion am Kreis (Spektrum der Wissenschaft 9/2004, S. 106) wird auch »Spiegelung am Kreis« genannt, obgleich ein spiegelnder Kreisrand ein ganz anderes Bild erzeugt. Eine Inversion bildet das Innere des Kreises auf das Äußere ab und umgekehrt; die Kreislinie wird auf sich selbst abgebildet. Der Bildpunkt P' eines Punktes P unter der Inversion liegt, vom Kreismittelpunkt M aus gesehen, in derselben Richtung wie P, und zwar so, dass das Produkt der Entfernungen beider Punkte von M gleich dem Quadrat des Kreisradius ist: $\overline{MP} \cdot \overline{MP'} = R^2$. In der komplexen Zahlenebene finden wir das Bild unter der Inversion an dem speziellen Kreis mit Mittelpunkt 0 und Radius 1 als das Konjugierte des Kehrwerts.

In drei Dimensionen kann man die Inversion in nahe liegender Weise auf die Kugel ausdehnen.



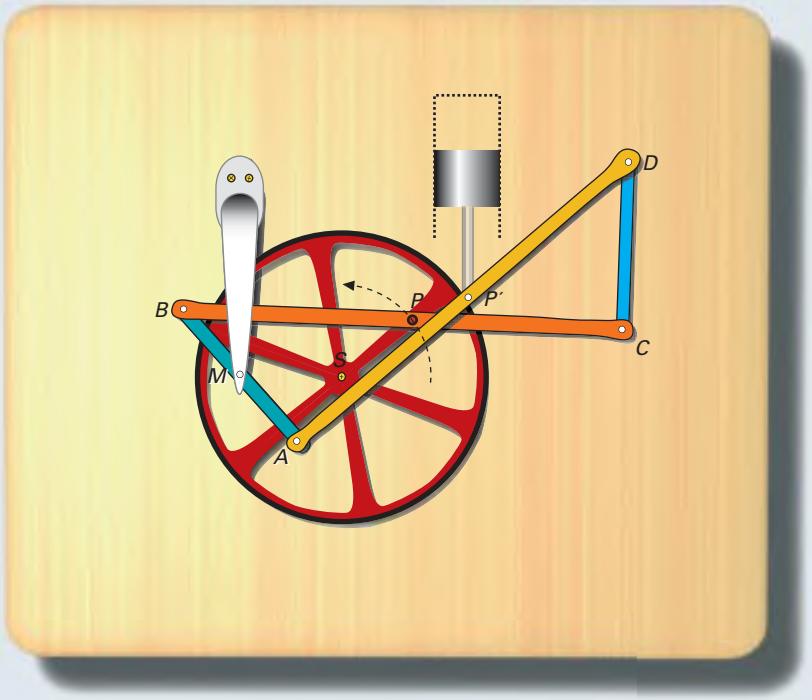
Einen Kreis, der durch den Mittelpunkt M des Inversionskreises geht, bildet die Inversion auf eine Gerade ab: Wenn P auf dem gezeichneten Kreis durch M wandert, bewegt sich dessen Inversionsbild P' auf einer Geraden, die rechtwinklig zur Geraden durch die beiden Kreismitten liegt (ähnliche Dreiecke im Bild oben links).

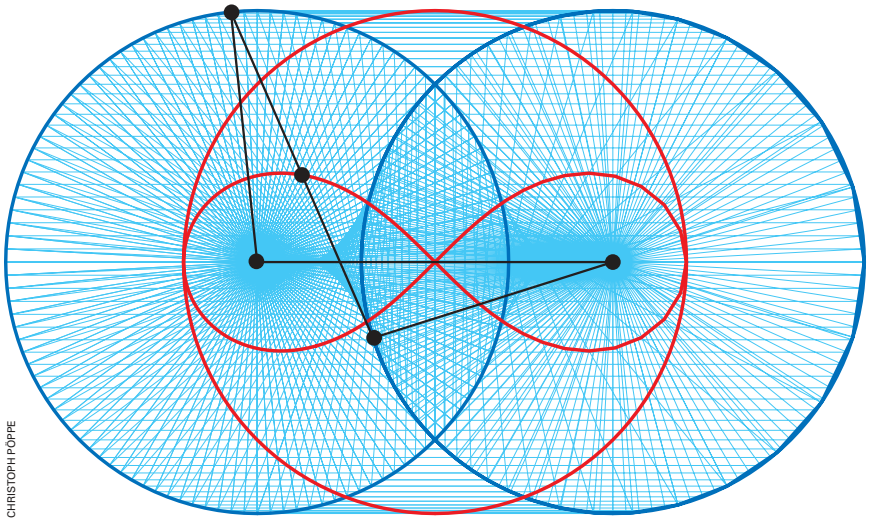


Diese Situation finden wir auch in dem Antiparallelogramm $ABCD$ vor (Bild oben rechts): Wir ziehen die Mittelparallele des zugehörigen Trapezes $ACDB$ (jede andere Parallele würde denselben Dienst leisten). M, P und P' sind die Mitten der drei Seiten $\overline{AB}$, $\overline{DA}$ und $\overline{BC}$. Wir zeigen nun, dass in jeder Stellung des Antiparallelogramms P und P' durch eine Inversion an einem Kreis um M aufeinander abgebildet werden.

BQ sei das Lot von B auf MP und $\overline{QR}$ so lang wie $\overline{MQ}$. Dann sind die beiden getönten Dreiecke APM und BRP' (mit Klappung) deckungsgleich zueinander und $\overline{MP} = \overline{RP'}$, also $\overline{MR} = \overline{PP'}$. Wir interessieren uns für $\overline{MP} \cdot \overline{MP'} = \overline{RP'} \cdot \overline{MP} = \overline{RP'} \cdot (\overline{RP'} + 2 \cdot \overline{QR}) = (\overline{RP'} + \overline{QR})^2 - \overline{QR}^2 = \overline{QP'}^2 - \overline{MQ}^2$. Mit dem Satz des Pythagoras an den Dreiecken QRB und $QP'B$ finden wir, dass das Produkt $\overline{MP} \cdot \overline{MP'} = \overline{P'B}^2 - \overline{MB}^2$ ist, also nur von den Längen der Seiten des Antiparallelogramms und nicht von den Winkeln abhängt.

Als Gelenkmechanismus wäre das wie im nebenstehenden Bild zu realisieren. Die Punkte M und S sind fest mit der Grundplatte verbunden, P mit einem Punkt auf dem Umfang des Rades. Wenn P auf einem Kreis um S rotiert, wandert P' auf einer Geraden, die rechtwinklig zu MS liegt: Das Rad treibt den Kolben oder umgekehrt.





CHRISTOPH PÖPPE

Ein spezielles Gelenkviereck erzeugt eine Bernoulli-Lemniskate. Die Koppelmitte kann auf dem Kreis oder der Lemniskate laufen und an den Berührpunkten beider wechseln. Damit Letzteres nicht passiert, sind bei Lokomotiven stets nicht nur zwei, sondern mehr Räder miteinander durch Stangen gekoppelt.

Sie ist nicht zu verwechseln mit der Gerono-Lemniskate, die eine Lissajous-Kurve ist.

In der Nähe des Mittelpunkts verläuft die Bernoulli-Lemniskate recht genau geradlinig. Dieses Teilstück der Kurve nutzte James Watt zur Geradführung des Stempels in der Dampfmaschine, jedoch mit einer schlankeren Kurve mit kleineren Armen.

In modernen Dampfmaschinen oder auch Verbrennungsmotoren sind diese ausgeklügelten Mechanismen allerdings nicht zu finden. Es hat sich als geschickter herausgestellt, den Geradlauf des Kolbens mit anderen Mitteln zu erzwingen und zur Umwandlung der geradlinigen in eine Drehbewegung so banale Mechanismen wie Pleuelstangen und Kreuzköpfe zu verwenden. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

Ebene Kinematik. Von W. Wunderlich. BI, Mannheim 1979

Geradführung durch Gelenkmechanismen. Kapitel 16 in: Von Zahlen und Figuren. Von Hans Rademacher und Otto Toeplitz. Springer, Berlin 1930; Nachdruck 1968

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Winzers Erbe

Von Pierre Tougne

Ein Winzer hat 45 Weinfässer. Davon sind jeweils neun vollständig gefüllt, zu drei Vierteln gefüllt, halb voll, zu einem Viertel gefüllt und leer. Die möchte er gerecht unter seinen fünf Kindern verteilen: Jedes Kind soll die gleiche Anzahl Fässer und die gleiche Menge Wein bekommen, ohne dass umgefüllt wird. Außerdem soll jedes der Kinder mindestens ein Fass von jedem Füllungsgrad haben, und jede Kombination von Fassanzahlen soll nur einmal vorkommen; es sollen also nicht zwei Kinder das gleiche Sortiment erhalten.

Was tun? Es gibt drei wesentlich verschiedene Lösungen, das heißt solche, die nicht durch Permutation unter den Kindern auseinander hervorgehen.

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei T-Shirts »Pioneer 11«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 16. 5. 2006, eingehen.

Lösungen zu »Ein höllisches Sudoku« (März 2006)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a		1			6	5	4		
b					8	4	1		
c	4	6		9	2	1	3	7	
d		5		1	9		2	3	
e		2	3	5	4		7		
f		9		2	3	7	6	5	
g		8		4	7	2	9		3
h			2	6	5	9	8	4	
i		4	9	8	1	3	5	2	

Es geht ohne Backtracking; die zweitschwierigste Methode (»Ausdünnen«) scheint allerdings unvermeidlich.

Bezeichnen wir die Zeilen des Schemas mit a bis i, die Spalten mit 1 bis 9 und die Kästchen mit A bis I wie in dieser Abbildung angedeutet.

Manche Zahlen findet man auf einen Blick: In Kästchen B sind die beiden oberen Zeilen für die Eins gesperrt wegen der Einsen in Kästchen A und C. Ebenso sperren die Einsen in E und H die beiden linken Spalten von Kästchen B. Für die Eins in B bleibt also nur Platz c6. Auf demselben Weg findet man e4 = 5. Diese Methode soll im Folgenden Standardverfahren (abgekürzt S) heißen; sie funktioniert auch dann, wenn nicht alle vier Nachbarkästchen bereits die fragliche Zahl enthalten, aber mehrere noch zulässige Plätze bis auf einen bereits anderweitig besetzt sind.

Die Besetzung von i6 findet man, indem man alle Möglichkeiten durchgeht und feststellt, dass nur die Drei noch passt; entsprechend h6 = 9. Dieses Verfahren ist aussichtsreich, wenn die zum Feld gehörigen Klassen (»Klasse« ist der Oberbegriff zu Zeile, Spalte und Kästchen) schon reichlich besetzt sind.

In H sind noch 2, 4 und 7 zu vergeben; davon sind in Spalte 6 schon 4 und 7 ausgeschlossen, also g6 = 2. Nach demselben Schema: In 5 sind noch 2, 4, 7 zu vergeben, davon 2, 4 ausgeschlossen in c, also c5 = 2.

f4 = 2 (S).

Von den noch fehlenden Zahlen aus Spalte 4 müssen 3, 7, 9 in B sitzen; da bleibt für g4 nur noch 4.

e5 = 4 (S); g5 = 7 (letzte Zahl von Spalte 5); h7 = 8 (alle Belegungen durchprobieren); d7 = 2 (einziger Platz für die Zwei in Spalte 7); ebenso c7 = 3; d8 = 3 (S); h8 = 4 (einziger Platz für 4 in 8); i2 = 4 (S); c4 = 9 (einzige Möglichkeit); mit derselben Begründung: c2 = 6, f2 = 9, e2 = 2, f7 = 6, i7 = 5, g7 = 9.

An dieser Stelle sind die einfachen Möglichkeiten erschöpft. Es empfiehlt sich, in jedes noch freie Feld sämtliche Möglichkeiten einzutragen – mühsam, aber hilfreich (Bild rechts oben). Man hält nun Ausschau nach zwei gleichen Zahlenpaaren in derselben Klasse, zum Beispiel 68 in d6 und e6. Die nützen einem (noch) nichts, aber 37 in b2 und b4 erlauben den Schluss: Die Drei und die Sieben müssen in b auf diesen beiden Plätzen stehen, also kann man sie von allen anderen Plätzen in b streichen.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	237 89	1	78	37	6	5	4	89	289
b	235 79	37	57	37	8	4	1	69	256 89
c	4	6	58	9	2	1	3	7	58
d	678	5	467 8	1	9	68	2	3	489
e	168	2	3	5	4	68	7	189	189
f	18	9	148	2	3	7	6	5	148
g	156	8	156	4	7	2	9	16	3
h	137	37	2	6	5	9	8	4	17
i	67	4	9	8	1	3	5	2	67

Das erzwingt b3 = 5. Man streiche alle anderen Fünfen in Zeile b und Spalte 3 und finde c3 = 8. Das schließt alle anderen Achten in Zeile c, Spalte 3 und Kästchen A aus, und nach demselben Schema kommt man ziemlich schnell bis zur Lösung (unten).

Die Gewinner der drei Computerspiele »Sudoku« sind Franziska Schedel, Bühl-Altschweier; Coralie Wink, Dossenheim; und die Klasse 5a des Gymnasiums Renningen.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	9	1	7	3	6	5	4	8	2
b	2	3	5	7	8	4	1	9	6
c	4	6	8	9	2	1	3	7	5
d	7	5	6	1	9	8	2	3	4
e	8	2	3	5	4	6	7	1	9
f	1	9	4	2	3	7	6	5	8
g	5	8	1	4	7	2	9	6	3
h	3	7	2	6	5	9	8	4	1
i	6	4	9	8	1	3	5	2	7

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Woher nehmen wir die Zeit?

Im Glücksspiel des Lebens wird jeder Augenblick zum Hauptgewinn.

»Stützt sich die Sonne auf des Abgrunds Schwingung, als reines Werk der ewigen Bedingung wird Zeit zum Glanz und Traum zur Wissenschaft«

Paul Valéry, Der Friedhof am Meer

Von Michael Springer

Wir alle wissen, wie die Zeit vergeht. Was jetzt ist, wird gleich vorbei sein und lässt sich dann nicht mehr ändern. Was als Zukunft auf uns zukommt, ist ungewiss. Nur: Was ist das, was da kommt und geht? Würde nichts sich ändern, bliebe die Zeit stehen; würde immerfort alles anders, gäbe es nur Momente ohne Zusammenhang. Darum sagt man: Die Zeit fließt. Aber was fließt da? »Der Zug der Zeit ist ein Zug, der seine Schienen vor sich herrollt. Der Fluss der Zeit ist ein Fluss, der seine Ufer mitführt«, schreibt Robert Musil. Nichts als Metaphern und Paradoxien. Solange es um das Wesen der Zeit geht, sind wir keinen Deut klüger als der spätantike Kirchenvater Augustinus: »Wenn mich niemand danach fragt, weiß ich es; will ich es jemandem, der danach gefragt hat, erklären, weiß ich es nicht.« Besser, wir fragen nicht nach dem Wesen. Fragen wir lieber: Was tun wir, wenn uns jemand nach der Zeit fragt? Wir schauen auf die Uhr.

Stellen wir also bescheiden fest: Zeit ist das, was Uhren messen. Seit jeher liefert die zyklische Wiederkehr des gleichen Vorgangs ein Zeitmaß – der Wechsel der Jahreszeiten, die Wiederkehr von Tag und Nacht. Der Stand des Schattens auf der Sonnenuhr zeigt die Tageszeit. Wenn wir eine große Sanduhr so eichen, dass sie von einem Sonnenaufgang zum nächsten exakt 24 Mal umgedreht werden muss, haben wir eine Stundenuhr. Ein Pendel schwingt periodisch und bewegt einen Zeiger, der die Minuten zählt.

Wir müssen Pendeluhren aber hin und wieder »aufziehen«, das heißt das Uhrgewicht, das über eine einfache Mechanik die Reibungsverluste ausgleicht, wieder gegen die Schwerkraft hinaufbefördern. Im Alltag sind wir gewohnt, dass eine Bewegung ohne Antrieb mit der Zeit erlahmt. Darum postulierte die mittelalterliche Physik, jede irdische Bewegung komme von selbst zum Stillstand, weil der »Impetus«, den zum Beispiel eine Kugel durch einen Stoß erhalte, mit der Zeit aufgezehrt würde. Nach dieser Theorie steigt eine Kanonenkugel in der verlängerten Richtung des Kanonenrohrs geradlinig empor, bis sie ihren Impetus verliert und lotrecht zu Boden plumpst. Ungebremste, »ewige« Bewegungen gab es nur am Himmel als vollkommene Kreisbahnen. Erst die neuzeitliche Mechanik schuf mit Galileis Trägheitsprinzip, wonach jede kräftefreie Bewegung sich beliebig lange gleichförmig fortsetzt, die große Vereinigung von irdischer und himmlischer Physik.

Damit beginnt die Erfolgsgeschichte der modernen Naturwissenschaft – und zugleich entsteht das Problem, welche Rolle der Zeit darin zufällt. Die Newton'sche Mechanik beschreibt mit denselben Gesetzen Planetenbahnen und irdische Wurfparabeln. Der Preis dieses Erfolgs ist die Unanschaulichkeit der Newton'schen Physik: Sowohl das Trägheitsprinzip als auch das Gravitationsgesetz waren seinerzeit ähnlich arge Zumutungen wie heutzutage die seltsamen Regeln der Quantenphysik. Eine Bewegung, die ohne Krafteinwirkung bis in alle Ewigkeit weitergeht – wie im Himmel also auch auf Erden und noch dazu schnurgerade –, war für das mittelalterliche Bewusstsein ein Skandal. Und auf die Frage, welcher konkrete Mechanismus mit Stoß, Zug oder Druck sich denn nun hinter der augenblicklich über astronomische Distanzen wirkenden Schwerkraft verberge, gab Newton bloß die trotzige Auskunft: Hypothesen erfinde ich nicht.

Newtons dynamisches Grundprinzip sagt: Kraft ist Masse mal Beschleunigung. Letztere

ist die zweite Ableitung des Wegs nach der Zeit t. Wenn man t durch $-t$ ersetzt, ändert sich nichts an der Formel, denn minus mal minus ergibt plus. Darum ist die Newton'sche Physik invariant gegen Zeitumkehr. Jeder Vorgang kann ebenso gut zeitlich verkehrt ablaufen.

Der Fluss der Zeit verliert durch Newton seine ausgezeichnete Richtung: Vorwärts, rückwärts, der Mechanik ist das einerlei. Das passt auf ideale Wurfparabeln und Planetenbahnen, auf elastische Stöße und mathematische Pendel. Aber reale Pendeluhren benehmen sich eher mittelalterlich: Wenn man sie nicht aufzieht, erlahmt ihr Impetus, sie bleiben stehen. Zeitumkehr-Invarianz ist in der Realität die seltene Ausnahme. Aus den meisten Alltagsvorgängen wird, wenn man sie als verkehrten Film abspult, ein Wunder. Nur im Kino zieht sich der Flaschengeist aus Tausendundeiner Nacht, der aus seiner Ampulle entwichen ist und riesig über Sindbad schwebt, spontan zusammen und schlüpft wieder in sein enges Gefängnis zurück. Offensichtlich verhalten sich Gase nicht zeitsymmetrisch. Dass komprimierte Luft spontan ausströmt, sobald sich eine Öffnung bietet, zählt zu den leidvollen Erfahrungen des Radfahrers. Das Umgekehrte – spontanes Sich-von-allein-Aufpumpen eines Platten – ist mindestens so märchenhaft wie die freiwillige Rückkehr des Geistes in seine Flasche.

Auf solche Probleme ließen die Physiker sich erst ein, nachdem mit der Dampfmaschine die industrielle Revolution in Fahrt gekommen war. Ein geschlossener Wasserkessel wird erhitzt, der Dampfdruck treibt einen Kolben, aus Wärme wird Bewegungsenergie. Und wenn wir die Bremse betätigen, verzettelt sich die Vorwärtsbewegung des Gefährts als diffuse Erwärmung der Bremsbacken.

Entropie und der Pfeil der Zeit

Das sind irreversible Vorgänge. Die Hitze des Dampfs – oder die Reibungswärme von Maschinenteilen – diffundiert auf Nimmerwiedersehen in die Umgebung. Der expandierte Dampf im Kolben kontrahiert sich nicht von selbst wieder auf Kosten der Umgebungswärme; und Bremsbacken kühlen sich niemals spontan ab, um stillstehende Fahrzeuge in Gang zu setzen. Bei allen Energieumwandlungen bleibt zwar die Gesamtenergie stets erhalten – das besagt der Erste Hauptsatz der Wärmelehre –, aber die Energie verliert mit der Zeit ihre Nutzbarkeit. Dies drückt der berühmte Zweite Hauptsatz aus: Die Entropie, ein abstraktes Maß für Nicht-mehr-Nutzbarkeit – oder Nivellierung, Vergeudung – der Energie, nimmt tendenziell zu.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Damit taucht in der Physik, die sich vordem nur auf reversible Prozesse spezialisierte, zwar endlich eine Richtung der Zeit auf, aber auf einem recht abgehobenen Niveau. In unserem alltäglichen Erleben ist das anders: Die Zeit ist eine so grundlegende Voraussetzung jeder Erfahrung – sind außerzeitliche Erfahrungen überhaupt vorstellbar? –, dass man meinen könnte, schon die fundamentalste Physik müsse eine Zeitrichtung auszeichnen. Doch alle physikalischen Vorgänge werden im Einzelnen nach wie vor durch Gesetze beschrieben, die keine Zeitrichtung kennen; das gilt nicht nur für Newtons Mechanik, sondern auch für Maxwells Gleichungen des Elektromagnetismus – und ebenso für Einsteins Relativitätstheorie und die quantenmechanische Schrödinger-Gleichung. Die Frage bleibt: Wie kann aus lauter reversiblen Einzelprozessen ein irreversibles Verhalten des Gesamtsystems hervorgehen?

Als Antwort formulierte der österreichische Theoretiker Ludwig Boltzmann Ende des 19. Jahrhunderts die Statistische Physik. Sie betrachtet Gase als Ansammlungen zahlreicher Atome, die, könnte man sie einzeln quasi unter dem Mikroskop verfolgen, nach den re- ▷

Seit dem Urknall verläuft die Geschichte des Universums in nur eine Richtung – nach Gesetzen, die keine Zeitrichtung kennen.

▷ versiblen Regeln der Mechanik umherschwirren und miteinander kollidieren. Wenn man aber von den mikroskopischen Einzelschicksalen absieht und das statistische Verhalten des gesamten Teilchenensembles untersucht, ergibt sich ein Zusammenhang zwischen Entropie und Wahrscheinlichkeit.

Wie Boltzmann vorrechnete, ist der im Großen und Ganzen ungeordnete, energetisch nivellierte Systemzustand wahrscheinlicher als ein geordneter, differenzierter, und deshalb strebt das Gesamtsystem mit der Zeit zu höherer Entropie. Dies drückt die Boltzmann-Formel $S = k \log W$ aus – die Entropie eines Zustands ist proportional zum Logarithmus seiner Wahrscheinlichkeit –, die den Grabstein des Forschers ziert und vielleicht nicht weniger Berühmtheit verdient als Einsteins Energieformel $E = mc^2$.

Gegen Boltzmanns Theorie erhoben zeitgenössische Physiker sofort den nahe liegenden Einwand, sie widerspreche der Zeitsymmetrie der Grundgleichungen. Man brauche nur alle mikroskopischen Teilchenbewegungen umzukehren, und schon nehme die Entropie des makroskopischen Systems ab, in Widerspruch zum Zweiten Hauptsatz. Dieser »Loschmidt'sche Umkehreinwand« entspricht genau dem Filmtrick, durch den der Flaschengeist in seine kleine Phiole zurückkriecht. Tatsächlich hindert kein Gesetz der Mechanik einzelne Atome, die Freiheit der großen weiten Welt aufzugeben und sich in einem kleinen Behälter zu versammeln. Nur dass das viele tun, ist desto unwahrscheinlicher, je mehr Atome beteiligt sind – und diese Wahrscheinlichkeit nimmt mit der Zahl der beteiligten Teilchen sogar exponentiell ab. Wie Modellrechnungen des Heidelberger Physikers H. Dieter Zeh mittels Computer zeigen, müsste man schon bei einem zweidimensionalen »Gas« aus 50 Atomen ziemlich lange warten, bis sich alle zufällig in einem Sechstel der verfügbaren Fläche ansammeln, nämlich gut 10^{17} Mal so lange, wie das Universum alt ist.

Damit ist der Entropiesatz zwar statistisch gerettet und mit ihm eine physikalische Basis des Zeitflusses garantiert. Dennoch bleibt bemerkenswert, dass die Richtung der Zeit nicht in den physikalischen Grundgleichungen verankert ist, sondern erst aus Wahrscheinlichkeitsüberlegungen hergeleitet werden muss. Das gilt heute, nach Einstein und der Quantentheorie, genauso wie vor hundert Jahren. »Wenn wir sagen, eine bestimmte Variable sei ›die Zeit‹, machen wir keine Aussage über die fundamentale mechanische Struktur der Realität, sondern über die statistische Verteilung, mit deren Hilfe wir die makroskopischen Eigenschaften des Systems beschreiben«, betont Carlo Rovelli noch 2004 in seinem Buch »Quantum Gravity«. Und noch zugespitzter: »Die Existenz der Zeit ist das Resultat unseres Unwissens. Die Zeit ist Ausdruck unserer Unkenntnis des Mikrozustands.«

Heißt das etwa, die Zeit sei eine bloße Illusion, die Natur an sich zeitlos? Diese Idee ist so alt wie das menschliche Denken. Der antike Philosoph Parmenides argumentierte: Das Sein ist, das Nichtsein ist nicht. Gäbe es zeitliche Veränderung, so würde etwas entstehen, das vorher nicht da war – es müsste ein Übergang vom Nichtsein zum Sein stattfinden. Da es kein Nichtsein gibt, kann es weder ein Werden geben noch einen leeren Raum. Das Sein ist ewig, allumfassend, unveränderlich und lückenlos.

Der unwahrscheinliche Beginn des Universums

Die antike Gegenposition formulierte Demokrit: »Es gibt nur Atome und leeren Raum, alles andere ist Meinung.« Heute erscheint uns das als Vorwegnahme des modernen Standpunkts. Doch sogar in der neuzeitlichen Physik blieb der Atomismus lange umstritten. Selbst Boltzmanns Zeitgenosse Ernst Mach hielt die Existenz von Atomen für eine prinzipiell unbeweisbare Denkannahme; er soll bei jeder Erwähnung von Atomen spöttisch gefragt haben: »Ham's eins g'sehn?« Manche vermuten sogar, Boltzmanns Selbstmord hänge mit dem erbitterten Widerstand – unter anderem von Henri Poincaré und Max Planck – zusammen, auf den seine atomistische Begründung des Zweiten Hauptsatzes zunächst stieß. Ein Einwand lautete: Wenn die Entropie umso wahrscheinlicher ist, je höher sie ist, wieso ist sie dann gegenwärtig so unwahrscheinlich niedrig, dass sie noch weiter steigen kann?

Boltzmann konnte sich seinerzeit nur mit einem schwachen Ad-hoc-Argument verteidigen: Es muss in der Vergangenheit im beobachtbaren Teil des Universums eine riesige Zufallsfluktuation gegeben haben, gleichsam einen spontanen Ausbruch von unwahrscheinlicher Ordnung, von der die Entropiezunahme seither zehrt. Heute wäre Boltzmann mit dem kosmologischen Standardmodell gewappnet. Der Urknall und die nachfolgende Inflationsphase sorgten am Anfang für so niedrige Entropie, dass noch 13,7 Milliarden Jahre später unser heutiges Universum genügend Spielraum für weitere Entropiezunahmen bietet.

Wie groß diese Entropiekapazität ist, hat der Theoretiker Roger Penrose für ein homogenes, geschlossenes Modelluniversum aus 10^{88} Materie- und Strahlungsteilchen abgeschätzt. Er kommt auf eine Entropie von 10^{88}

▼ **Der altrömische Kirchenlehrer Augustinus (354–430) erkannte erstmals im Wesen der Zeit ein Problem voller Widersprüche.**

Aus urheberrechtlchen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

für den gegenwärtigen Zustand und den Wert von 10^{123} für einen Endzustand, bei dem dieses Universum zu einem einzigen Schwarzen Loch kollabiert. Um die Wahrscheinlichkeit der beiden Zustände zu vergleichen, müssen diese Zahlen gemäß Boltzmanns Formel noch zur Potenz erhoben werden, wobei der erste, kleinere Wert dann überhaupt nicht mehr ins Gewicht fällt. Das heißt: Der Endzustand ist um eine Eins mit 10^{123} Nullen wahrscheinlicher als der gegenwärtige. Diese Zahl, die den Spielraum für künftige Entropiezunahmen angibt, ist so ungeheuer groß, dass sie sich nicht einmal im Entferntesten hinschreiben lässt, wenn wir an jedes der 10^{88} Teilchen des Universums eine Null heften; es müssten schon 10^{35} Nullen pro Teilchen sein.

Das also ist die Antwort der Physiker auf die Frage nach dem Ursprung der Zeit: Sie kommt von den singulären Anfangsbedingungen des Universums, nicht von den fundamentalen Naturgesetzen. Der Urzustand unserer Welt war so unermesslich geordnet und unwahrscheinlich, dass die Naturgeschichte seither in einem Wechselspiel von lokaler Strukturbildung und insgesamt steigender Unordnung ablaufen kann. Dieser zeitlich unumkehrbare Ablauf wird geregelt durch zeitlich umkehrbare Gesetze.

Vergebliche Suche nach dem Entropie-Operator

Der altgriechische Atomist Epikur hat einst einen Anfang der Welt erdacht, der diesem Bild erstaunlich ähnelt: Ursprünglich sanken die Atome parallel in freiem Fall durch den Weltraum herab – sie bildeten, würden wir heute sagen, einen maximal geordneten Zustand laminarer Strömung. Doch gelegentlich kam es in diesem gleichmäßigen Partikelregen dann doch zu »Deklinationen«, zu winzigen Zufallsabweichungen einzelner Atome vom geraden Fall, und dadurch zur turbulenten Zusammenballung der Atome zu Dingen. Heute müssen die Physiker Quantenfluktuationen bemühen, um das Entstehen von Inhomogenitäten im frühen Universum zu erklären.

Eigentlich ist es kein Wunder, dass die theoretischen Physiker die Zeit möglichst weit aus der Welt hinausdrängen möchten. Die Physik sucht nach unveränderlichen Naturkonstanten und nach immer und überall gültigen Naturgesetzen. Ihr Ideal ist ein Blockuniversum, in dessen vierdimensionaler Raumzeit alle Bewegungen eingefroren sind wie die Einzelbilder auf einem Filmstreifen. Vielleicht deshalb war es auch kein Physiker, sondern der belgische Chemie-Nobelpreisträger Ilya Prigogine, der im letzten Drittel des vorigen Jahrhunderts einen Paradigmenwechsel »vom

Sein zum Werden« propagierte, indem er sich auf seine erfolgreiche Erweiterung der Statistischen Physik berief. Prigogine beschrieb so genannte dissipative Strukturen, das heißt offene Systeme, die in fortwährendem Austausch mit der Umgebung quasi Ordnung aufsaugen – wie wir Menschen das in unserer hochorganisierten Alltagswelt und angesichts der belebten Natur ja als Normalfall erleben. Davon ausgehend skizzierte Prigogine eine Einheitswissenschaft, in der die Zeit eine fundamentale Rolle spielen sollte; diese neue Physik würde das spontane Entstehen von Ordnung nicht mehr als unwahrscheinliche Ausnahme beiseite schieben, sondern sich der einheitlichen Beschreibung unterschiedlichster komplexer Strukturen widmen.

Prigogine wusste freilich, dass sein faszinierender Anspruch sich letztlich an einer Neuformulierung der fundamentalen Physik bewähren musste. Er versuchte darum gegen Ende seines Lebens, die Quantenmechanik als eine Art Ensembletheorie im Geiste Boltzmanns umzuformulieren. Die Zeit, die in der herkömmlichen Quantentheorie das Schattendasein eines bloßen Parameters fristet, sollte als Entropie-Operator den gleichen Rang beanspruchen wie die Observablen Ort, Impuls und Energie.

Dabei hätte sich die Zeit vervielfacht zu den individuellen Eigenzeiten unterschiedlich komplexer Systeme; jedes System hätte gleichsam seine innere Uhr in sich getragen, und jede hätte eine andere Zeit angezeigt. Die große Vereinigung der Naturwissenschaft unter der Hoheit des Entropiebegriffs scheiterte allerdings an der nichtklassischen Eigenart der Quantenphänomene – ein Schicksal, das Prigogines Ansatz mit Einsteins spätem Versuch einer Allgemeinen Feldtheorie teilt.

So bleibt die paradoxe Kluft zwischen zeitlichem Anfang und ewiger Dauer ungeschlossen, und wir empfangen jede Sekunde unseres halbwegs geordneten Lebens als unwahrscheinliches Geschenk des Zufalls. ◁

Michael Springer ist Schriftsteller und ständiger freier Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Entropie. Von H. Dieter Zeh, Fischer 2005

Phänomen Zeit. Spektrum Spezial 1/2003

The physical basis of the direction of time. Von H. Dieter Zeh. Springer, Heidelberg 2001

Vom Sein zum Werden. Von Ilya Prigogine. Piper, München 1979

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Ausbrüche auf der Sonne

Riesige Sonneneruptionen setzen die Energie von Milliarden Atombombenexplosionen frei. Wodurch werden diese Ereignisse ausgelöst?

ILLUSTRATION: DON DIXON

WEITERE THEMEN IM JUNI

Das Fruchtbarkeitsrätsel

Die Samenqualität europäischer Männer lässt nach. Forscher rätseln über die Ursachen

Pont du Gard

Kaum Gefälle, aber fünfzig Kilometer lang – das römische Aquädukt von Nemausus, dem heutigen Nîmes, beeindruckt durch seine Präzision

MINDEN PICTURES, FRED BAVENDAM

Das Meer wird sauer

Was wir an Kohlendioxid in die Atmosphäre blasen, landet am Ende zum großen Teil in den Ozeanen. Dort sorgt es für ein saures Milieu, das den Meeresbewohnern schlecht bekommt

KENN BROWN

Projekt persönliches Genom

Für tausend Dollar die eigene DNA-Sequenz auf Diskette für den Arzt – das könnte demnächst Wirklichkeit sein

FRANS B. M. DE WAAL

Tierisches Geschäftsgebaren

Menschen und Affen treiben nach den gleichen Mustern Handel miteinander: Sie kooperieren, zeigen sich dankbar – und vergessen vor lauter Zorn den eigenen Vorteil, wenn man sie übers Ohr haut